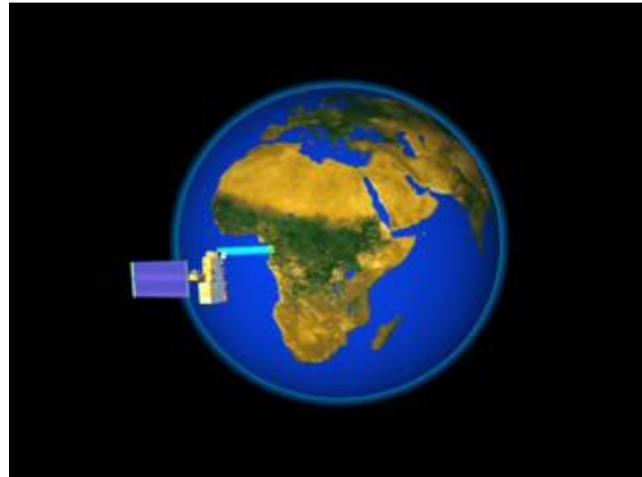


# ***IL TELERILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO AMBIENTALE***



***Roberto Colombo***

***LABORATORIO DI TELERILEVAMENTO DELLE DINAMICHE AMBIENTALI***

***UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO-BICOCCA***

***EMAIL: roberto.colombo@unimib.it***

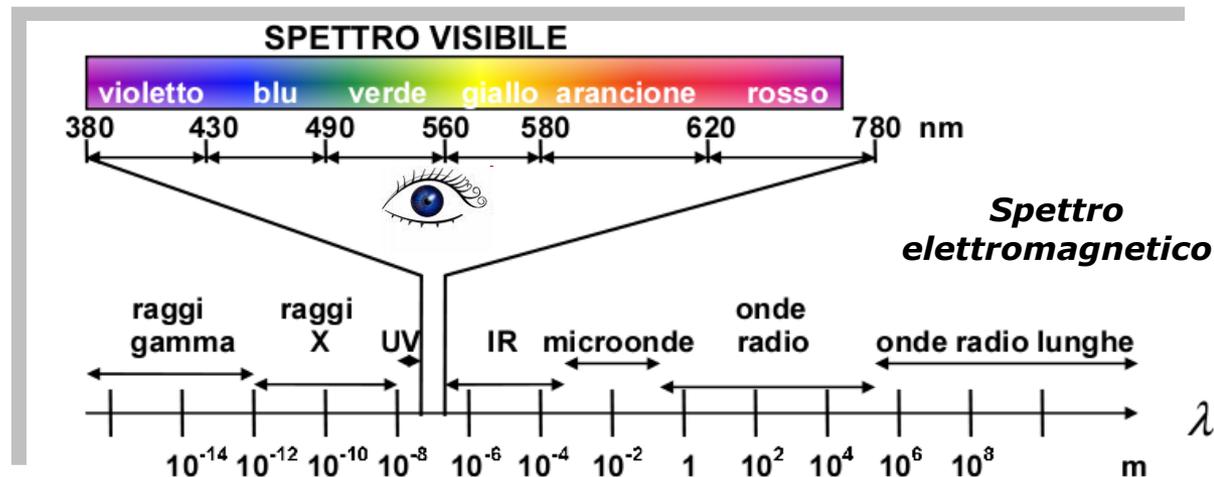
# Introduzione

## **Che cos'è il Telerilevamento (Remote Sensing) ?**

*Il telerilevamento è una scienza che permette di ottenere informazioni qualitative o quantitative relative a un oggetto o un'area tramite la registrazione e l'analisi di dati acquisiti da un dispositivo che non è direttamente a contatto con l'oggetto o l'area o investigata;*

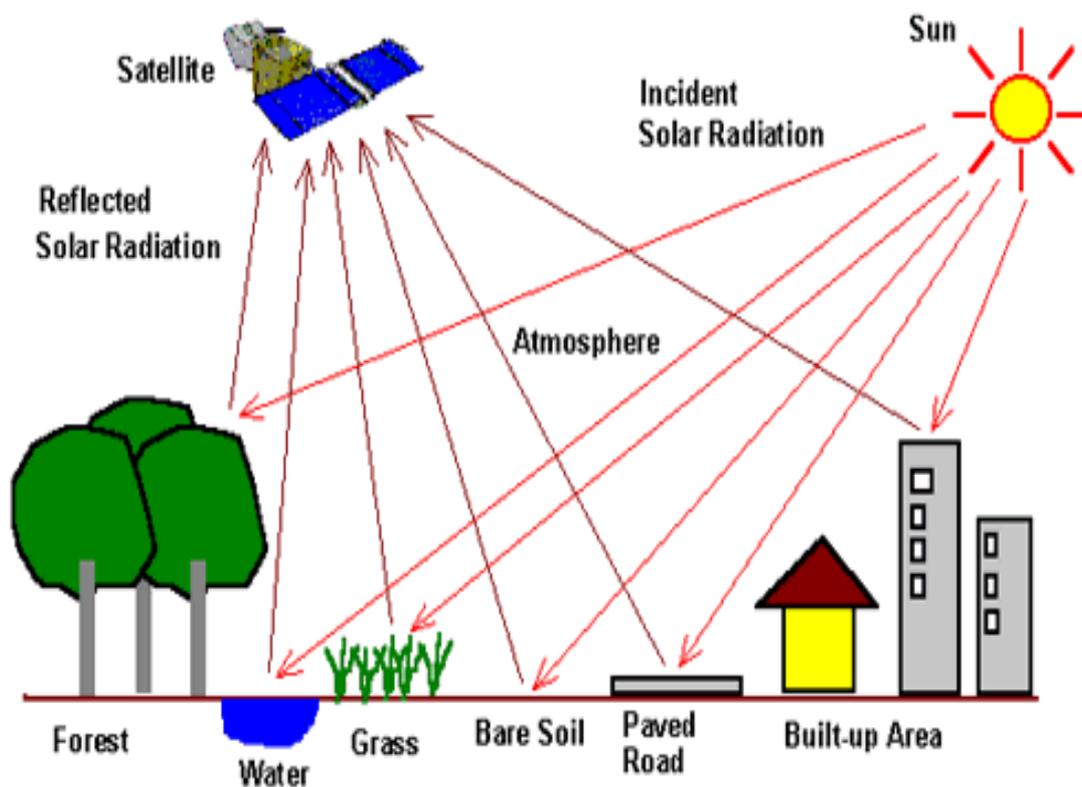
### **Più specificamente...**

*Lo studio delle caratteristiche di una determinata superficie avviene analizzando la radiazione da essa riflessa o emessa in differenti lunghezze d'onda, in vari domini dello spettro elettromagnetico.*



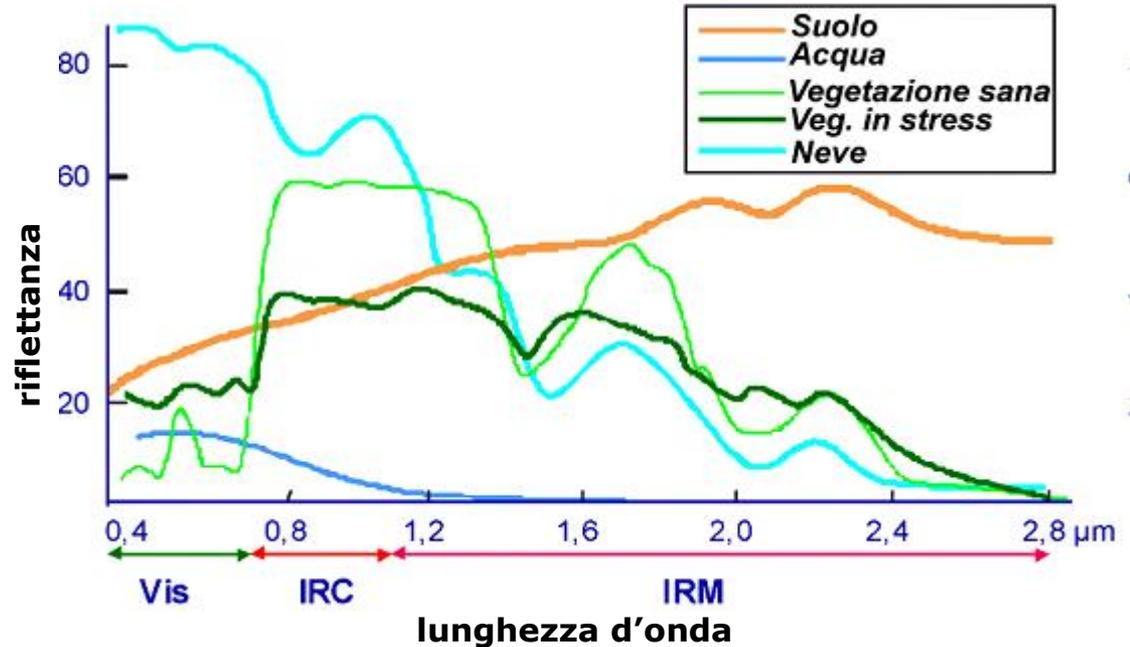
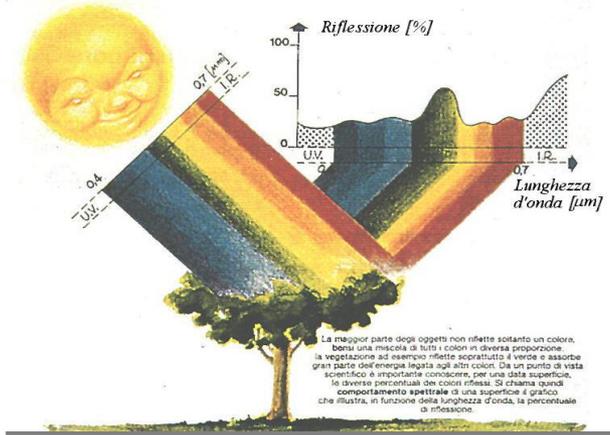
# Introduzione

La radiazione elettromagnetica *riflessa* o emessa da una superficie alle diverse lunghezze d'onda dipende dalle caratteristiche chimico-fisiche della superficie stessa



# Introduzione

## Il "principio di base": la firma spettrale



- **La radiazione solare riflessa da una superficie alle diverse lunghezze d'onda dipende dalle sue caratteristiche chimiche e fisiche !**



**Misurando la radiazione riflessa in diverse *bande spettrali* è possibile ottenere importanti informazioni relative alle caratteristiche del sistema terra-atmosfera**

# Esempio di immagini multispettrali satellitari

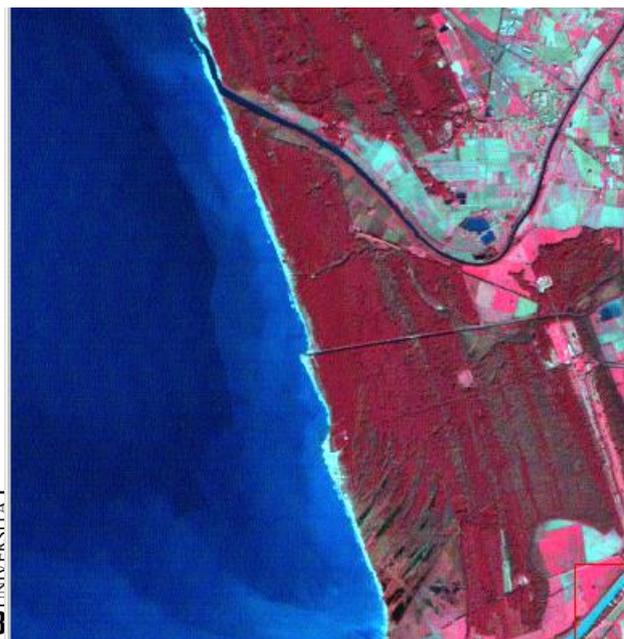


*RGB:321*

*B/N: B6*

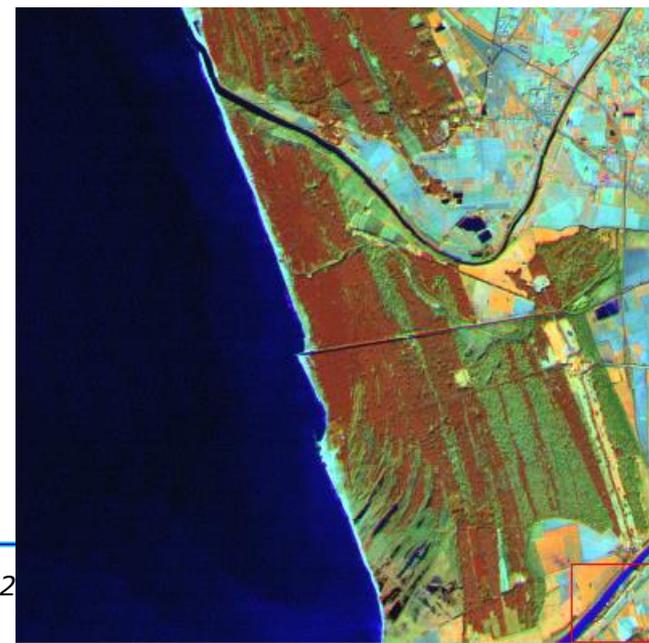


**Landsat-5 TM,  
25.11.00, Pineta  
di San Rossore**

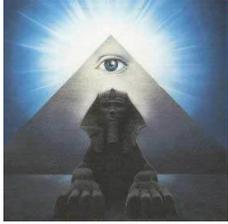


*RGB:432*

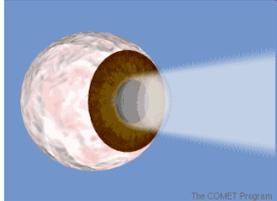
*RGB:453*



# Un po' di storia....



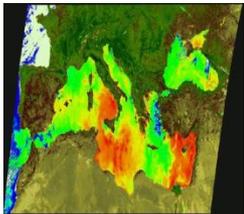
- Il più "antico" sistema di telerilevamento è costituito dal sistema occhio-cervello! L'occhio "misura" la radiazione proveniente dalle superfici nelle lunghezze d'onda del visibile (blu → rosso) e il cervello le elabora e le interpreta



- L'evoluzione tecnologica ha permesso di "potenziare" questo sistema:



- *"Trasportando" i nostri occhi dove non potrebbero arrivare attraverso l'installazione di appositi strumenti su piattaforme aeree o satellitari;*



- *Ampliando la gamma di lunghezze d'onda percepite, mediante lo sviluppo di strumenti "sensibili" a radiazioni invisibili all'occhio umano;*
- *Potenziando le capacità di elaborazione attraverso l'uso dei computer.*

# Un po' di storia....

- **Il telerilevamento "nasce" nei primi anni del '900, con le prime foto scattate da mongolfiere o aerei, spesso per applicazioni militari**



# Un po' di storia....

- ...le prime piattaforme



***Squadron of pigeons equipped with lightweight (~ 2.5 oz.)  
70-mm aerial cameras  
(from Jensen, 2000 – Deutsches Museum, Munich, Germany)***

# Un po' di storia....

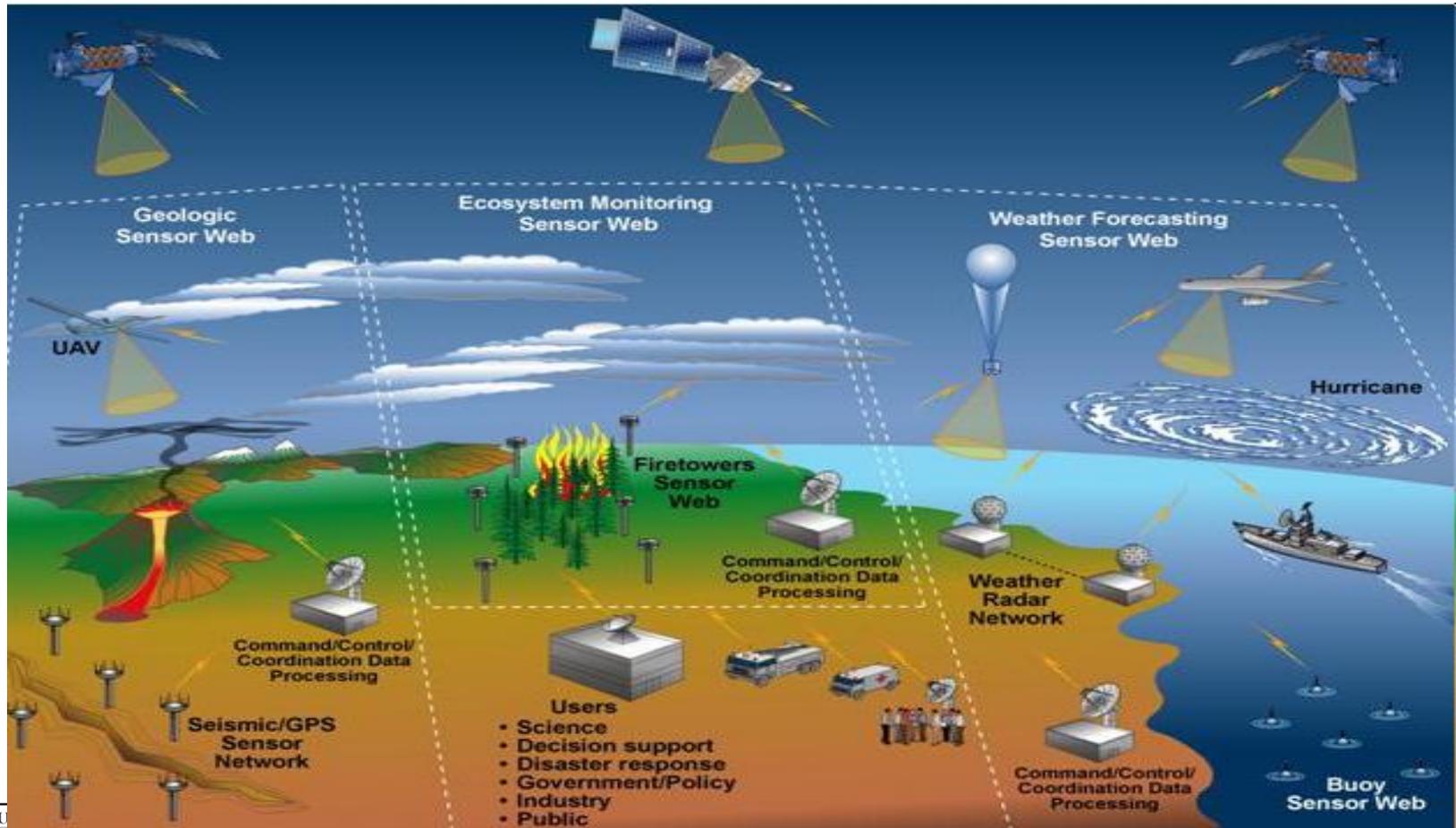
- La "corsa allo spazio" degli anni '50 e '60 fornisce grande impulso alla disciplina, con l'installazione dei primi strumenti montati su satellite per applicazioni meteorologiche o militari



# Un po' di storia....

**Attualmente esistono numerosi sensori per il telerilevamento, installati su "piattaforme" di diverso tipo**

**I dati sono ormai spesso facilmente reperibili e le applicazioni si sono moltiplicate...**







## **MONITORAGGIO AMBIENTALE**

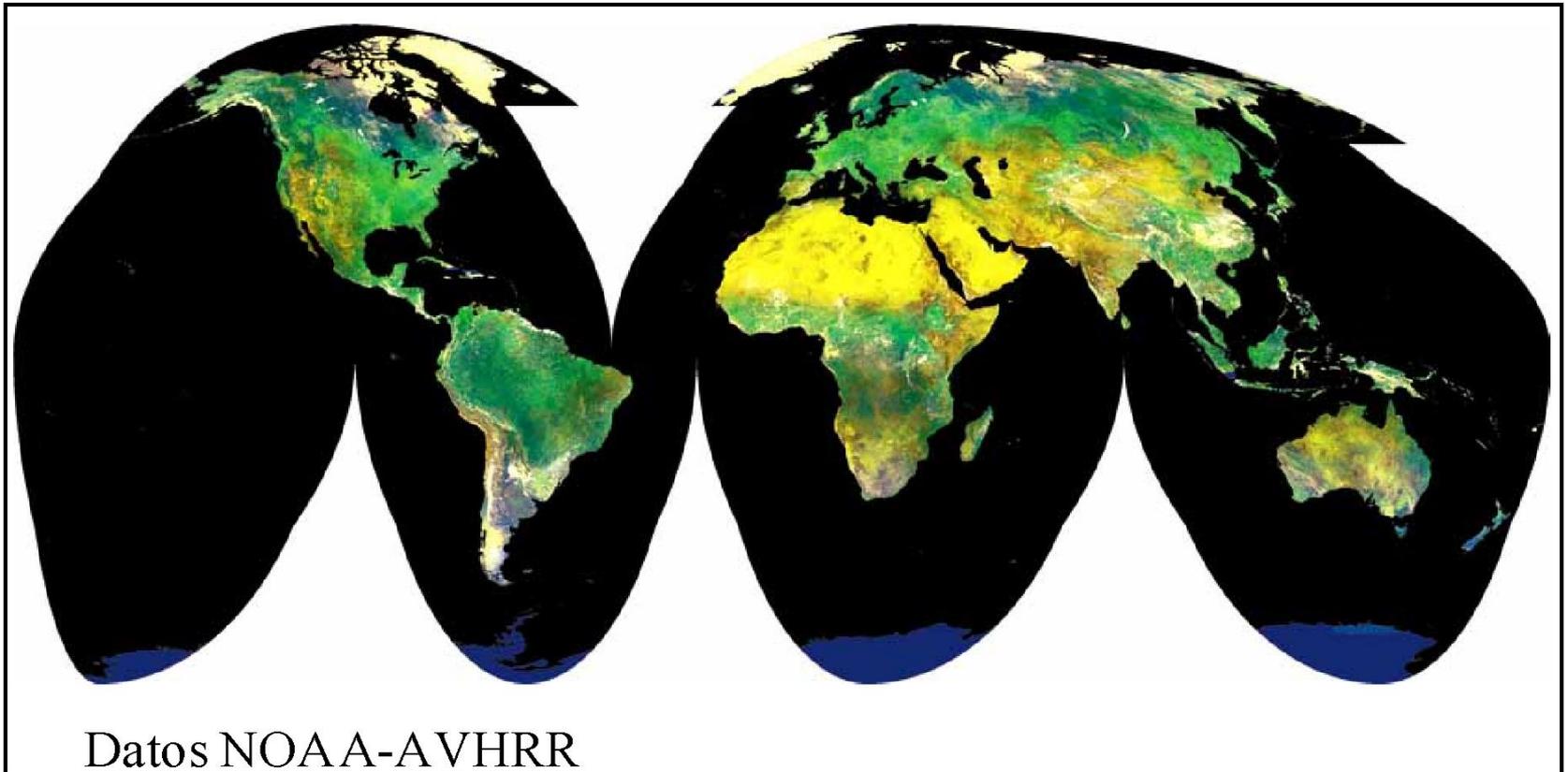
*Il termine monitoraggio deriva dal verbo latino monere, con il significato di ammonire, avvisare, informare, consigliare.*

*In ambito ecologico-ambientale, il monitoraggio consiste nella misurazione e nel controllo delle dinamiche strutturali e dei processi che caratterizzano gli ecosistemi. Essendo i processi ambientali molto complessi è necessario individuare degli indicatori che permettano di semplificarne l'analisi.*

*Le tecniche di telerilevamento offrono numerosi vantaggi per il monitoraggio ambientale...*

# Vantaggi delle tecniche di telerilevamento

## ➤ Osservazione globale della superficie terrestre

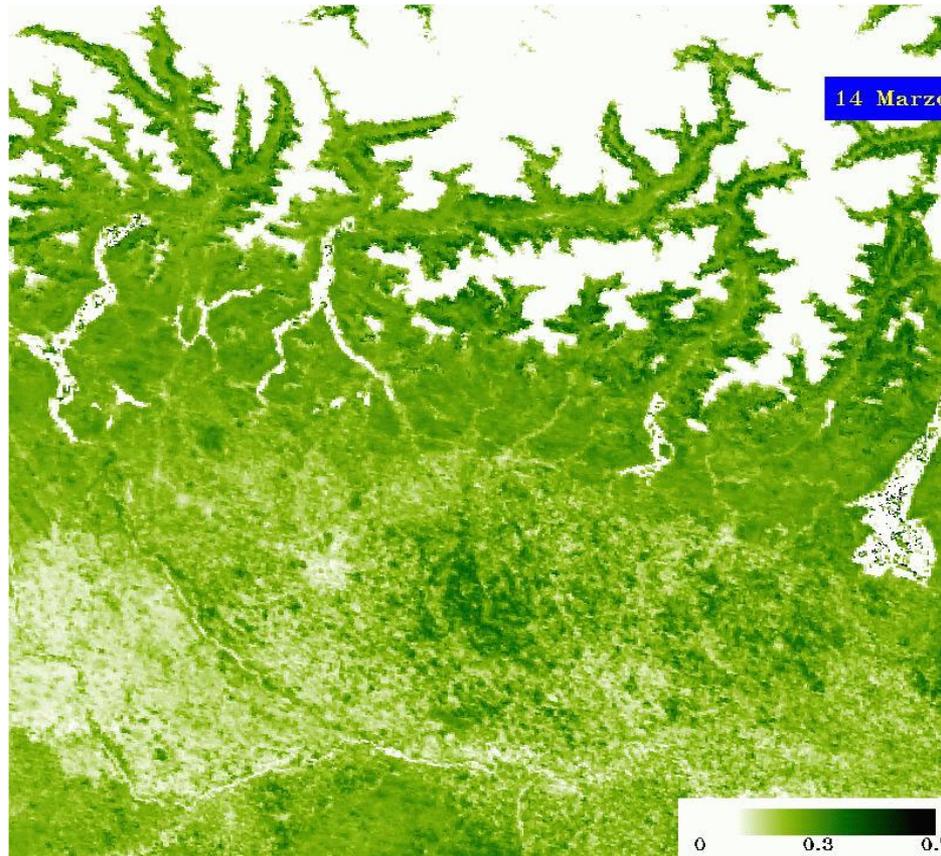


*Anche aree difficilmente accessibili possono essere analizzate*

*( es. Deserti, zone polari, foresta pluviale )*

# Vantaggi delle tecniche di telerilevamento

## ➤ Possibilità di osservazione multitemporale



*La stessa superficie può essere ripresa in diversi momenti, per cui è possibile analizzare fenomeni dinamici*

# Vantaggi delle tecniche di telerilevamento

## ➤ Possibilità di osservazione a differenti scale



Immagine GOES- EAST

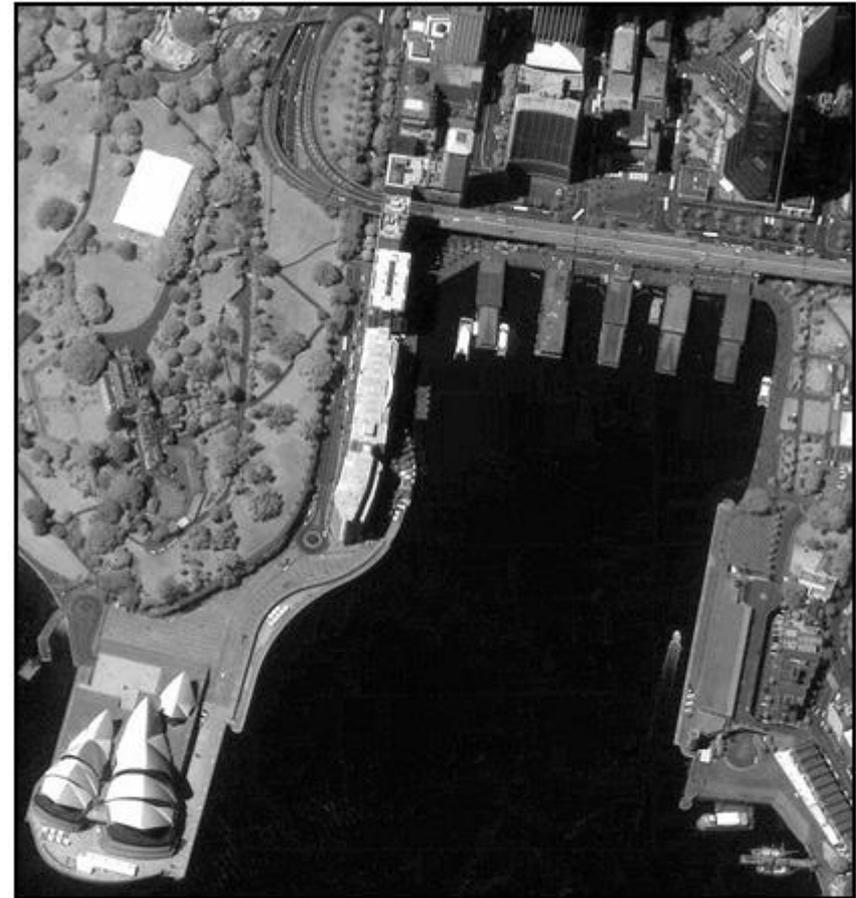


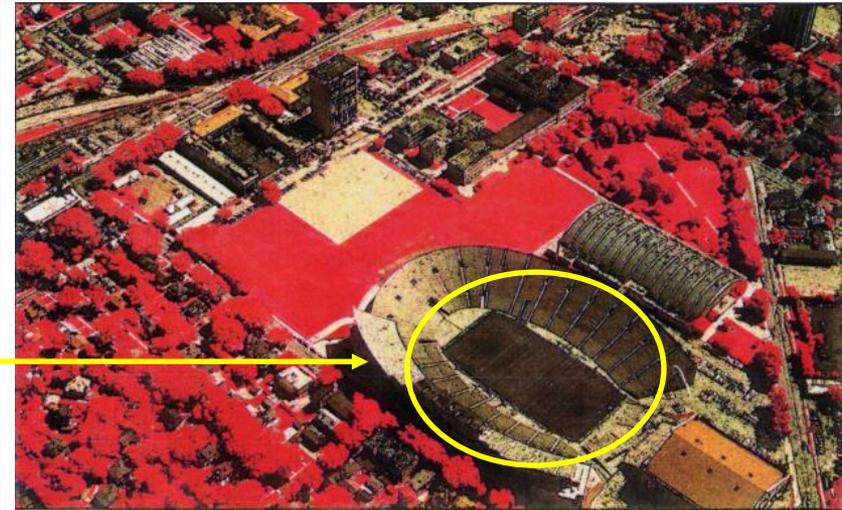
Immagine QuickBird

# Vantaggi delle tecniche di telerilevamento

- **Possibilità di misurazione della radiazione proveniente dalla superficie anche in regioni dello spettro fuori dal range del visibile**



**Sintesi RGB a colori reali**

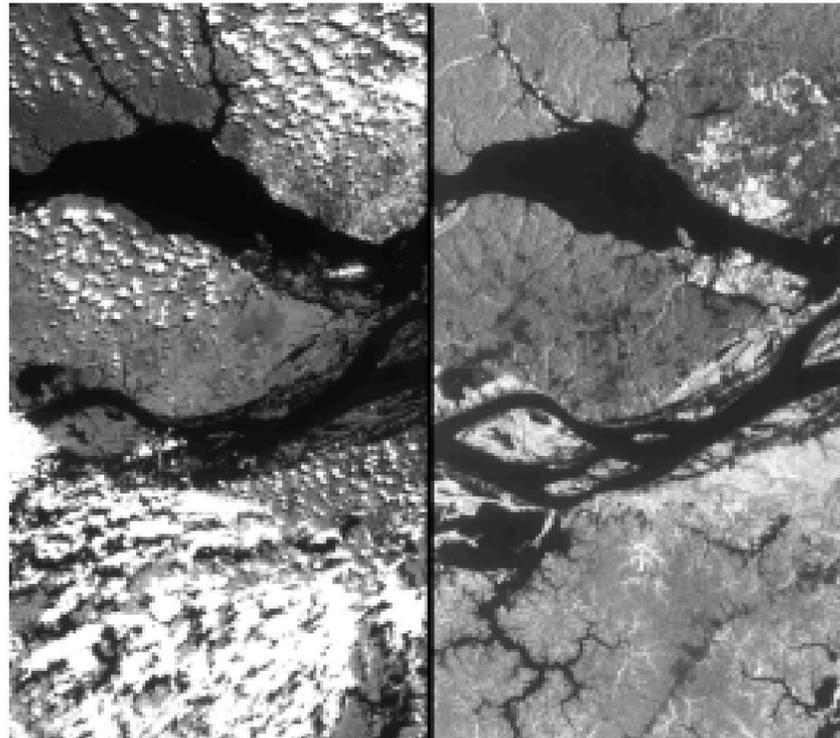


**Sintesi RGB a falsi colori**

*E' possibile individuare differenze nelle caratteristiche delle superfici non visibili "ad occhio nudo"*

# Vantaggi delle tecniche di telerilevamento

- **Possibilità di misurazione della radiazione proveniente dalla superficie anche in regioni dello spettro fuori dal *range* del visibile**



*Immagini Radar*

# **QUALI SONO LE PRINCIPALI APPLICAZIONI DEL TELERILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO AMBIENTALE ?**

- 1- Applicazioni nel campo della meteorologia**
- 2- Monitoraggio della vegetazione: agricoltura e foreste. Esempio di diagnostica precoce**
- 3- Monitoraggio delle superfici urbane**
- 4- Monitoraggio dei ghiacciai**
- 5- Gestione delle emergenze**
- ...**

## ➤ Meteorologia

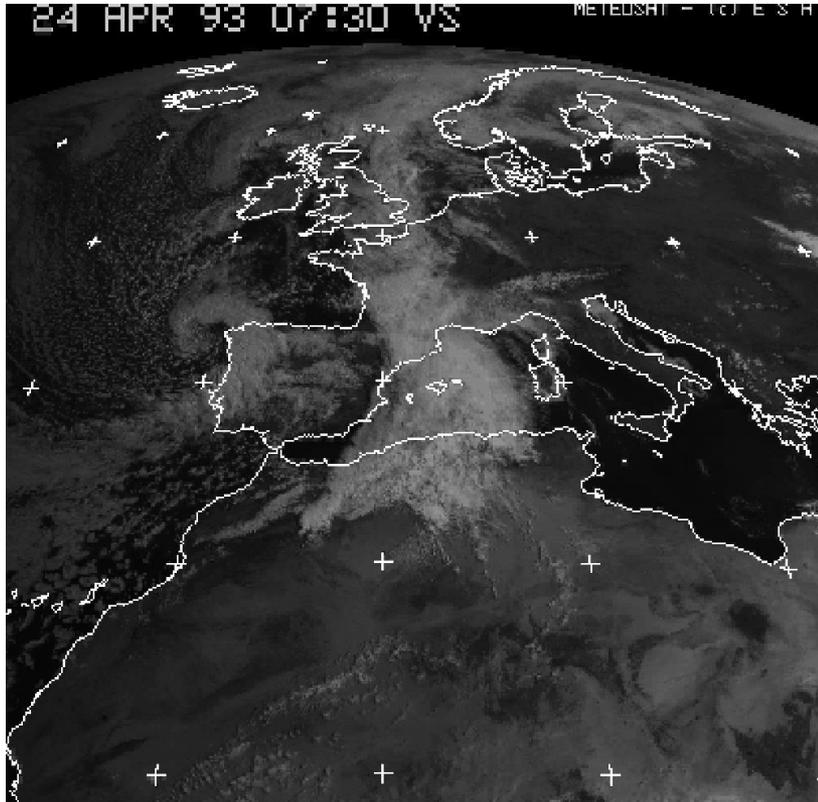


Immagine METEOSAT di un fronte freddo  
(1993)

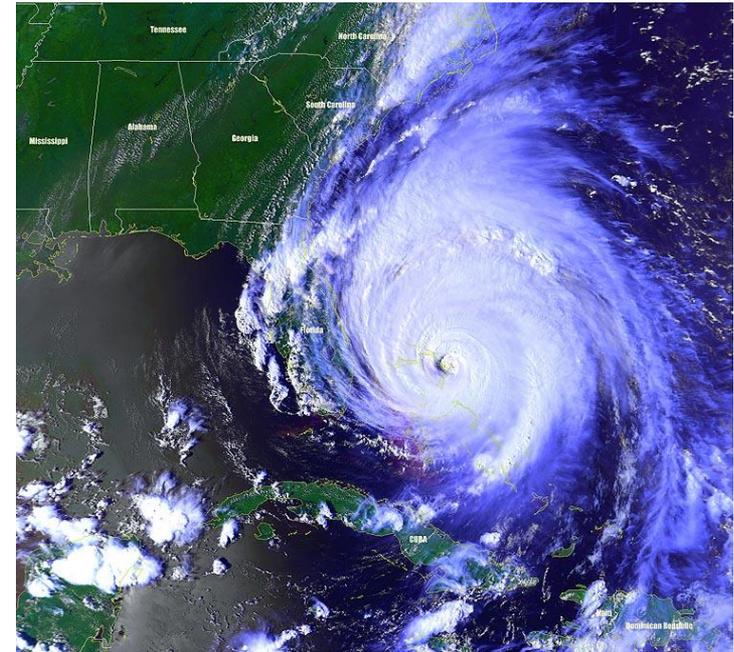
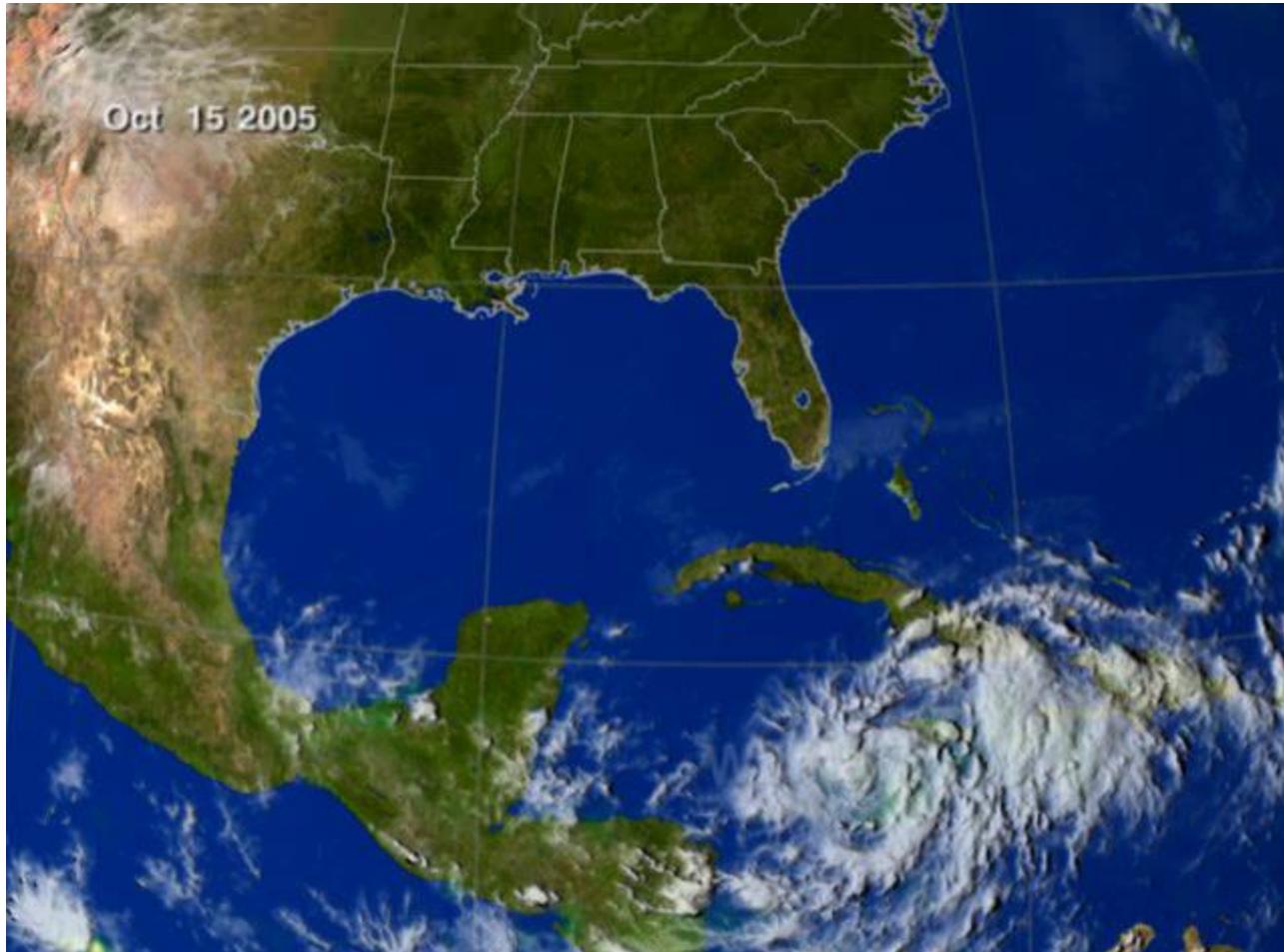
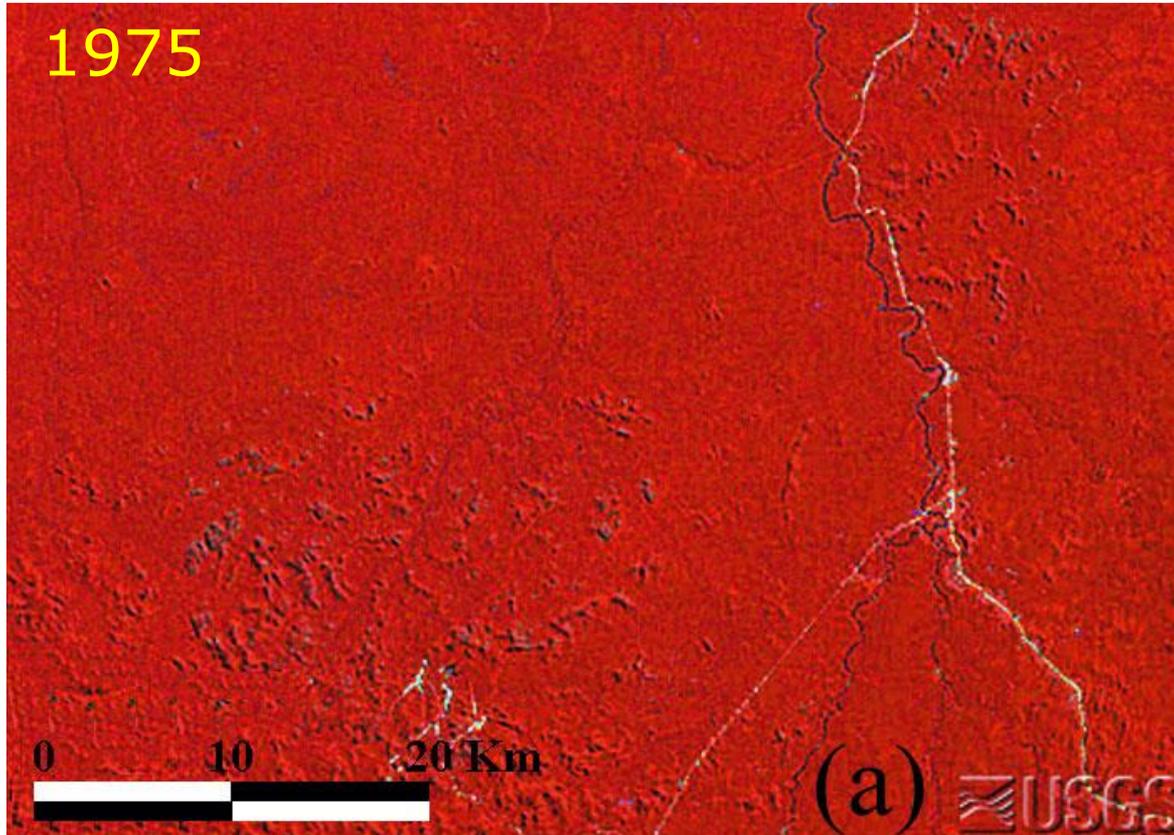


Immagine GOES di un ciclone tropicale  
(2001)

## ➤ Meteorologia

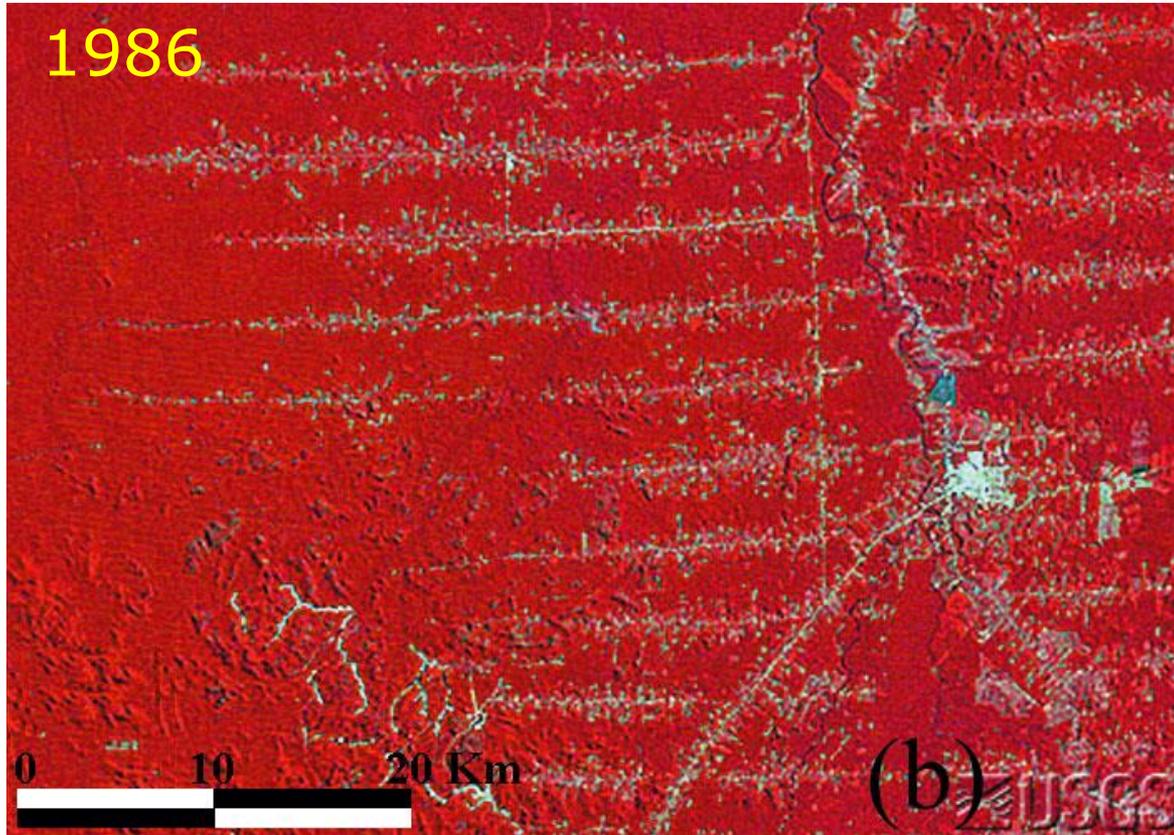


## ➤ Monitoraggio della vegetazione: Analisi della deforestazione



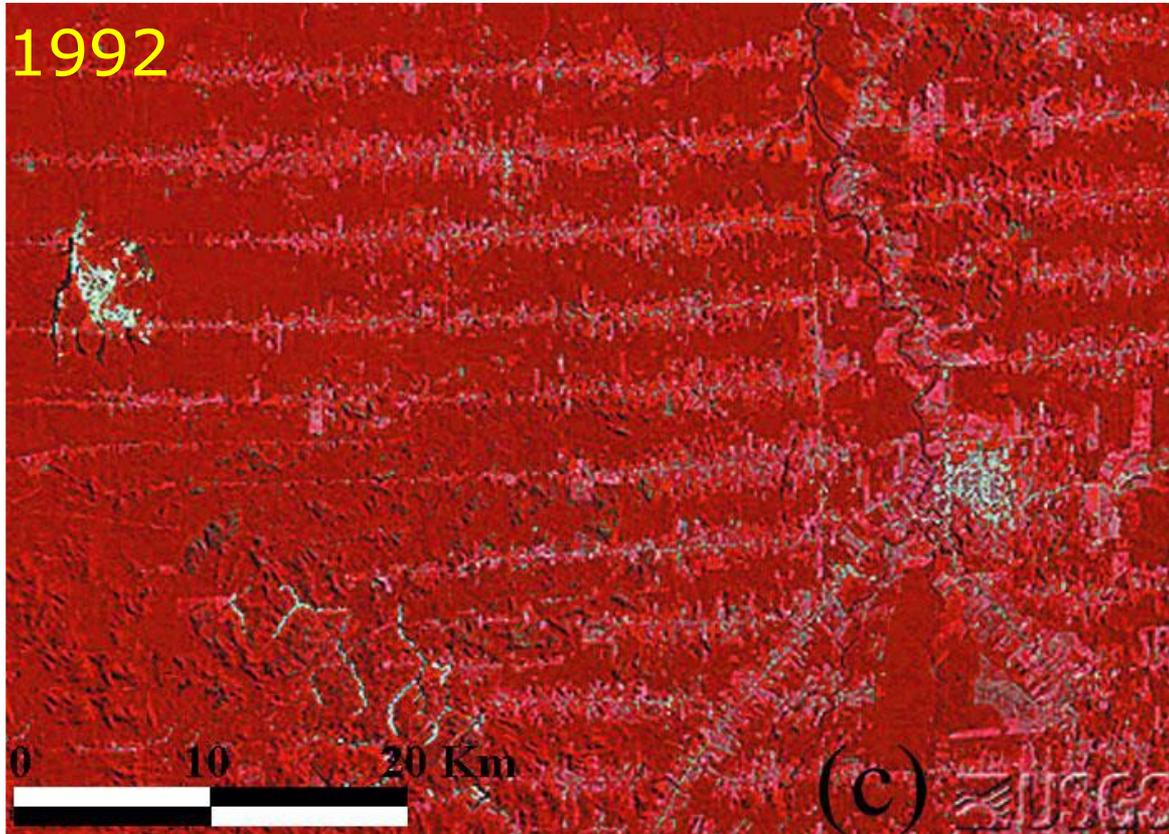
**Il processo di deforestazione della Rodonia  
(Brasile) tra il 1975 ed il 1992**

## ➤ Monitoraggio della vegetazione: Analisi della deforestazione



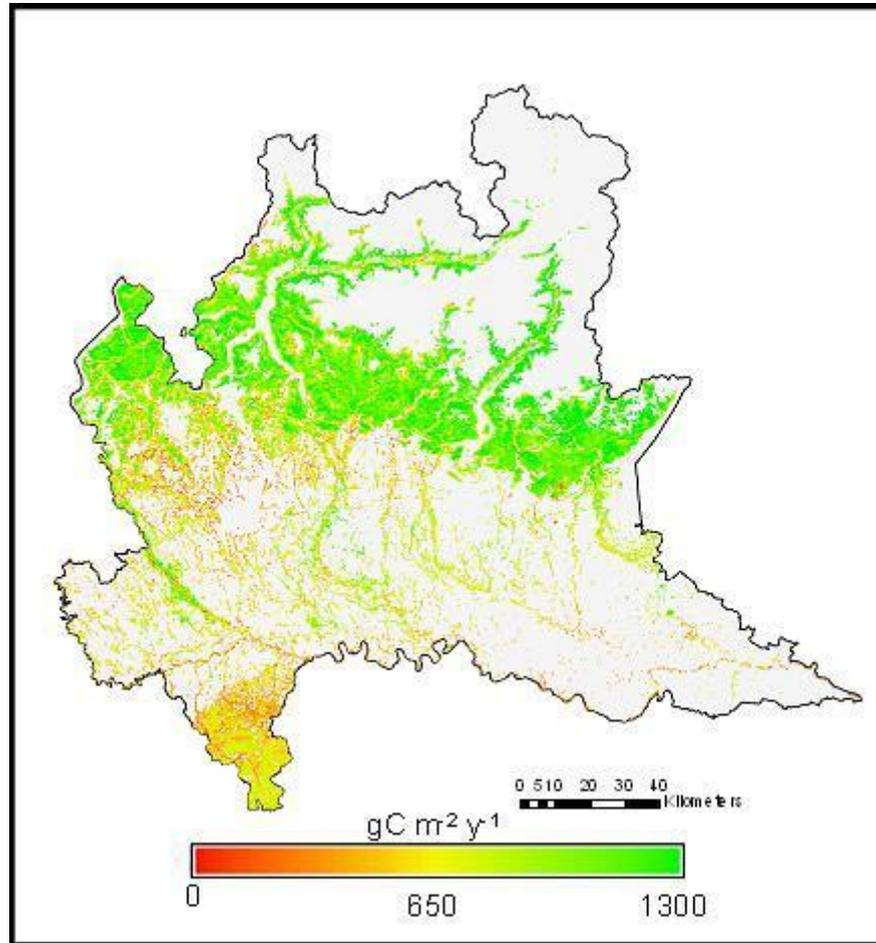
**Il processo di deforestazione della Rodonia  
(Brasile) tra il 1975 ed il 1992**

## ➤ Monitoraggio della vegetazione: Analisi della deforestazione



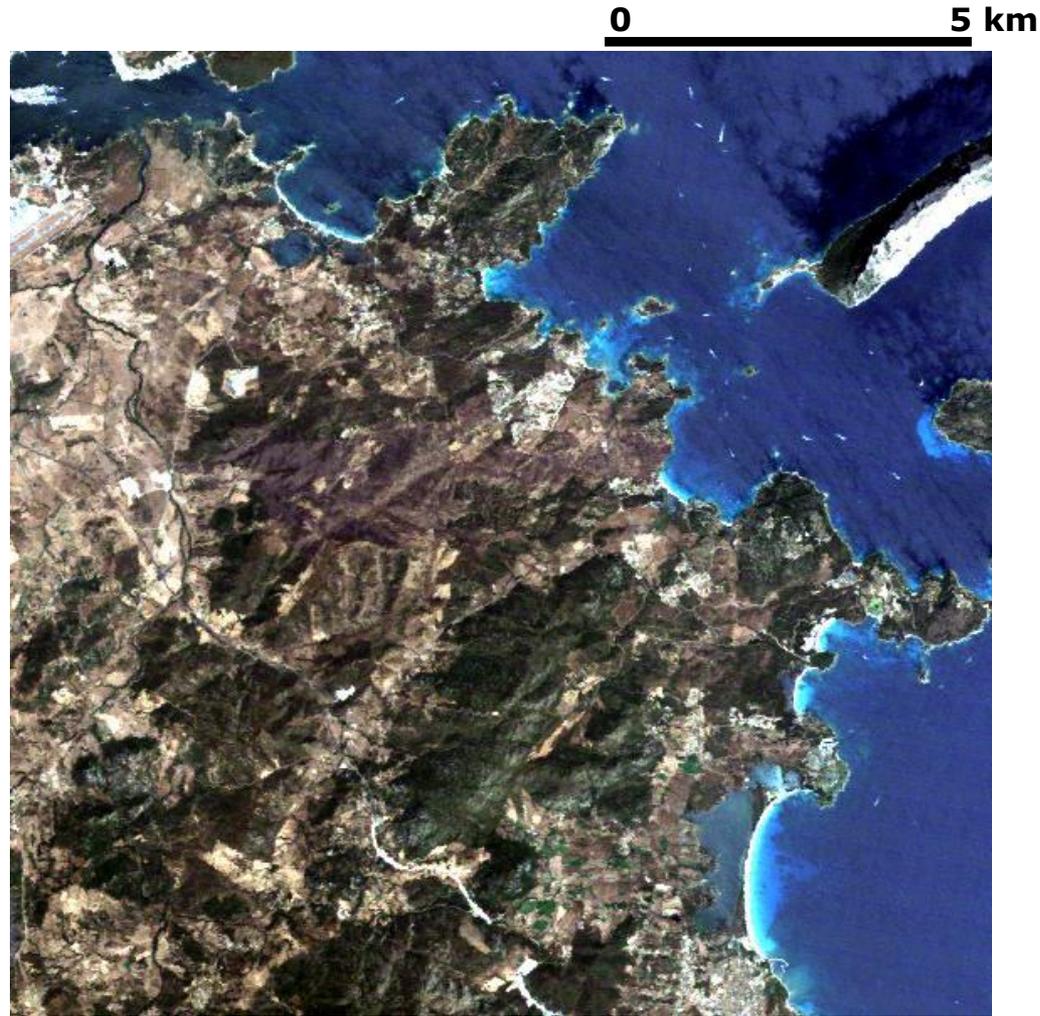
**Il processo di deforestazione della Rodonia  
(Brasile) tra il 1975 ed il 1992**

## ➤ Monitoraggio della vegetazione: Stima della Produzione Primaria delle foreste



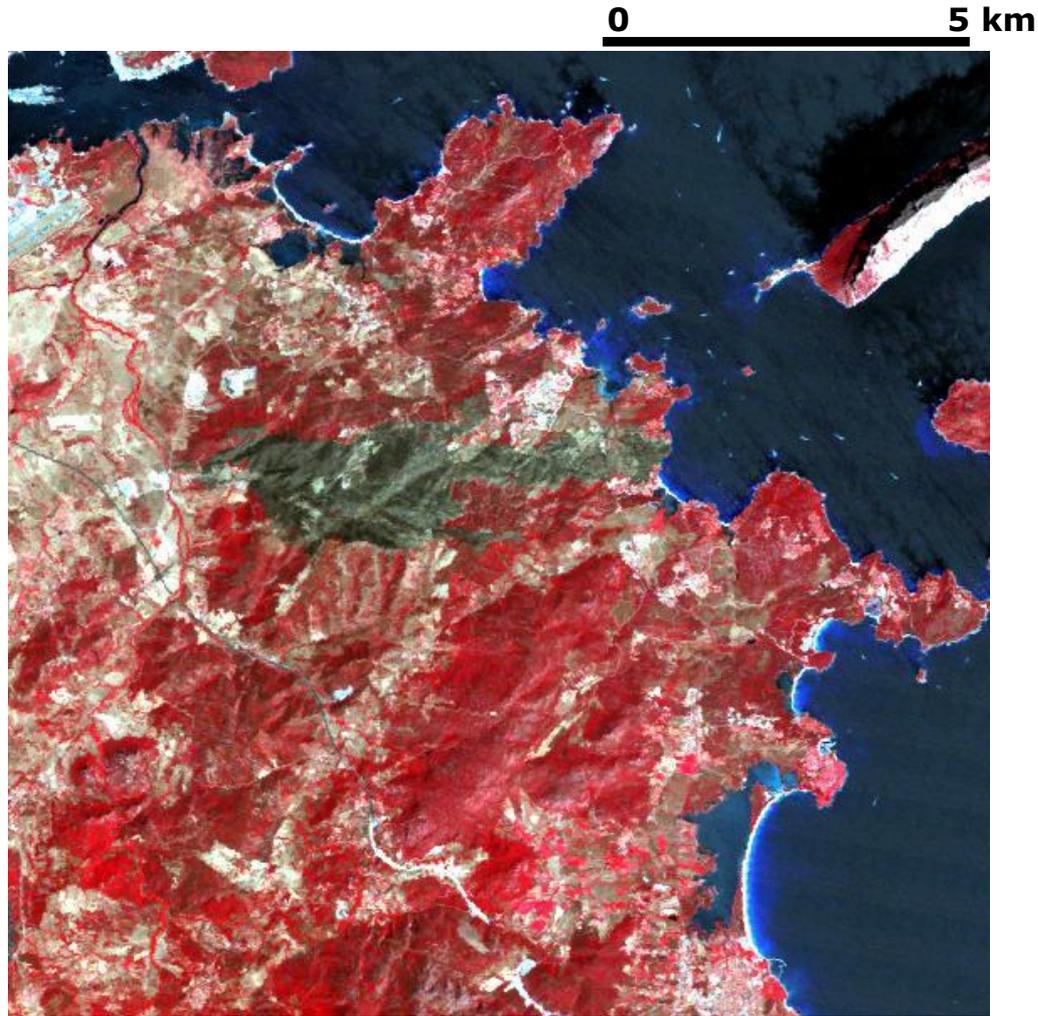
**Produzione Primaria Lorda (GPP) delle foreste lombarde – anno 2004**

## ➤ Riconoscimento e mappatura delle aree bruciate



Landsat-5 TM 193/32, Agosto 2004 Costa Smeralda. RGB:321

## ➤ Riconoscimento e mappatura delle aree bruciate



Landsat-5 TM 193/32, Agosto 2004 Costa Smeralda. RGB:432

## ➤ Riconoscimento e mappatura delle aree bruciate



Landsat-5 TM 193/32, Agosto 2004 Costa Smeralda. RGB:743

## ➤ Riconoscimento e mappatura delle aree bruciate

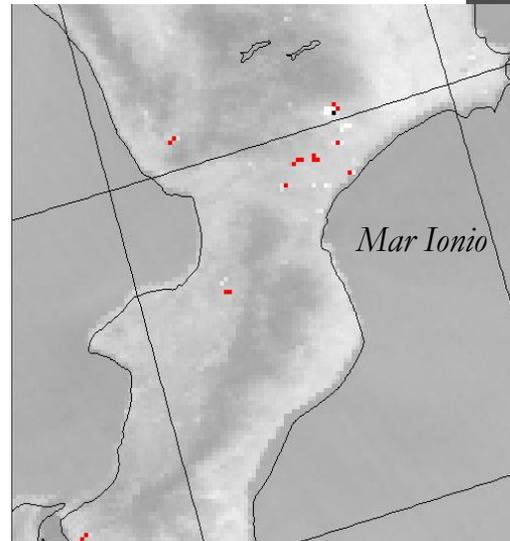


Landsat-5 TM 193/32, Agosto 1994



Landsat-5 TM 193/32, Agosto 2004

# INCENDI BOSCHIVI



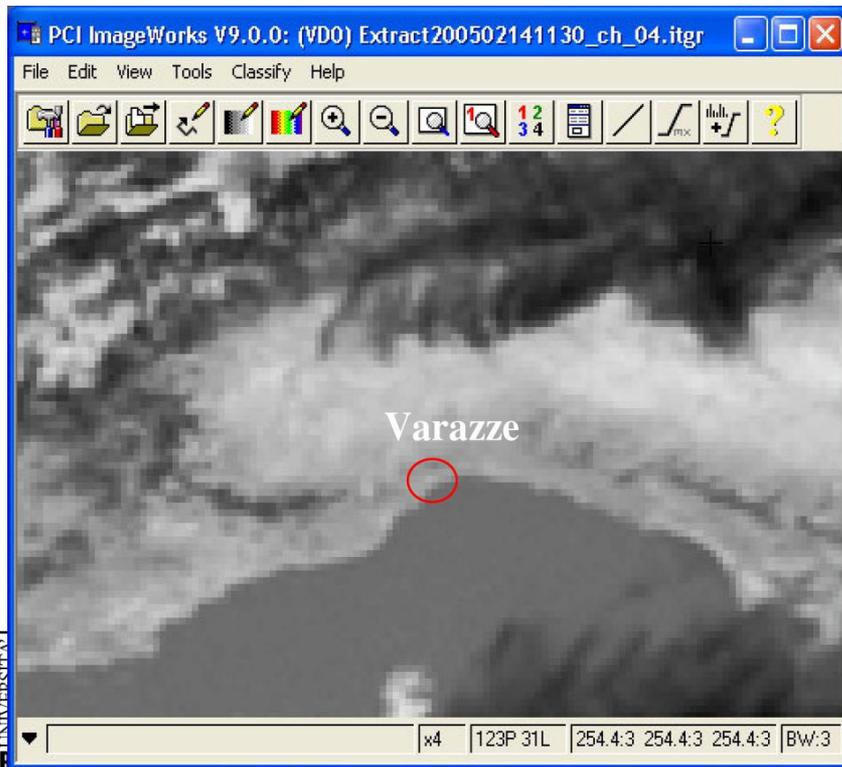
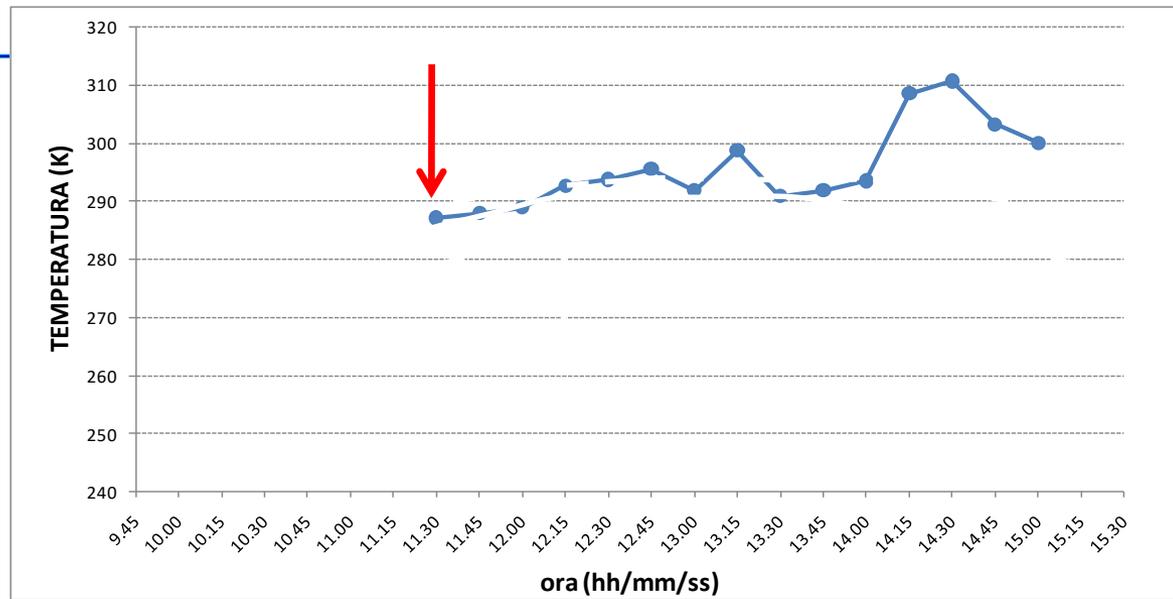
5 Luglio 2000 h15 GMT

 Anomalie termiche rilevate

Mazzeo G., (2005)

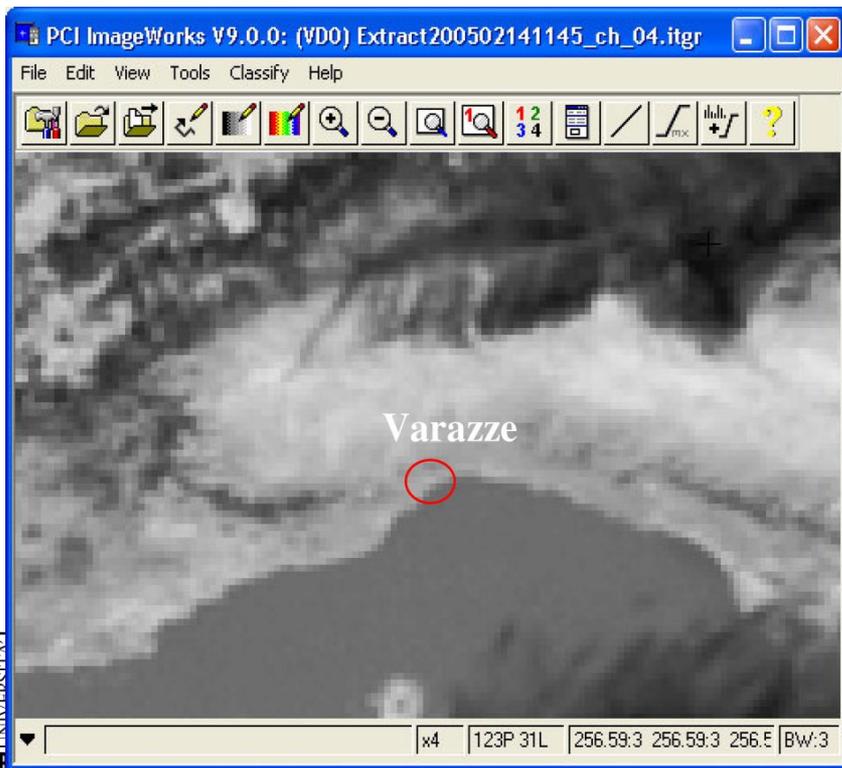
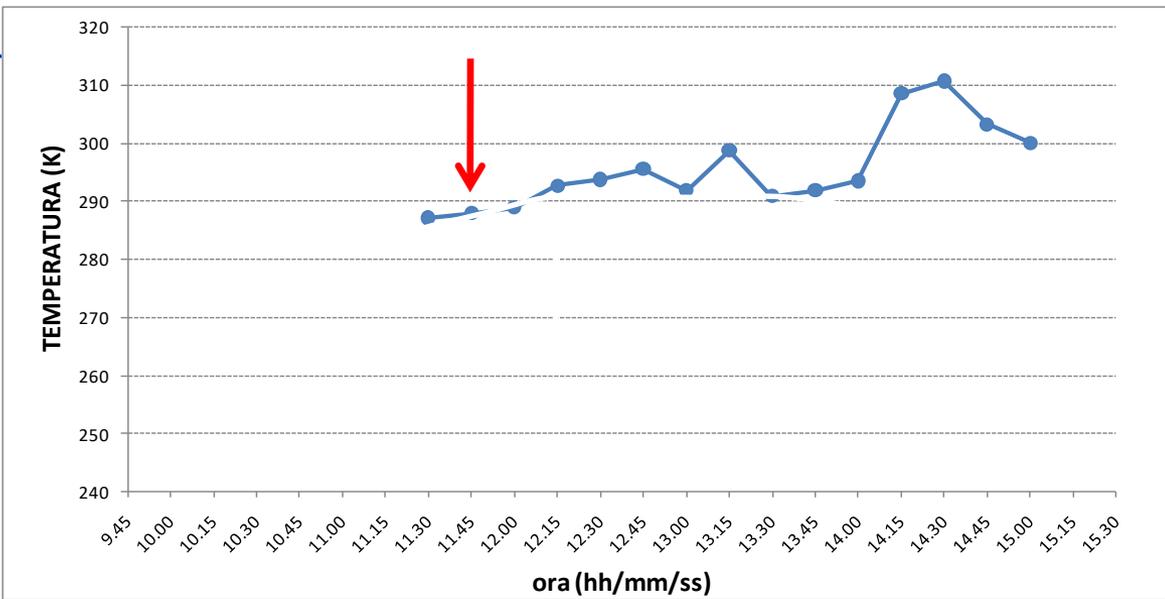


# Early detection

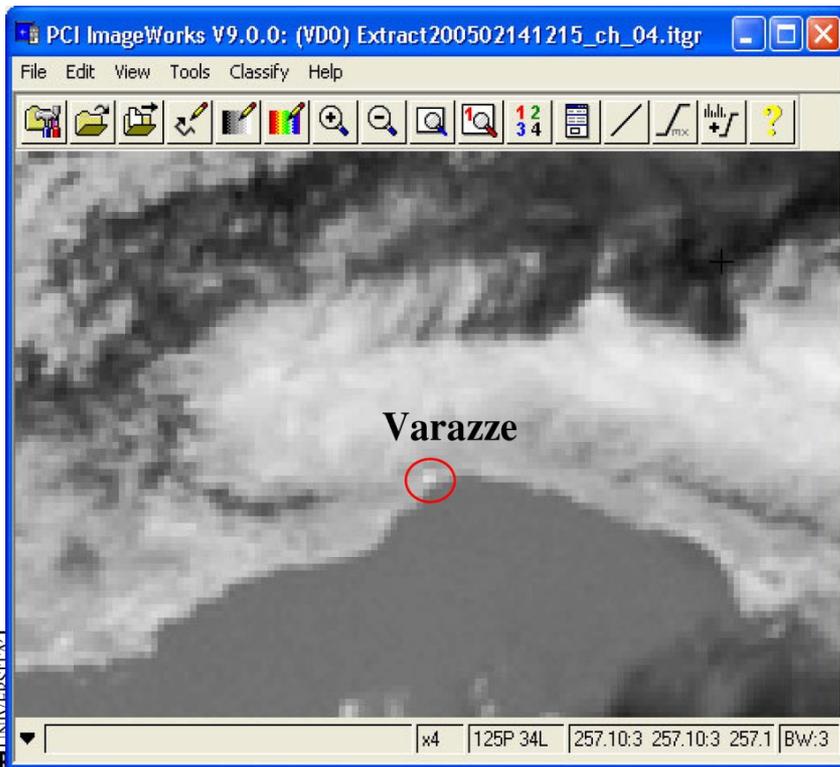
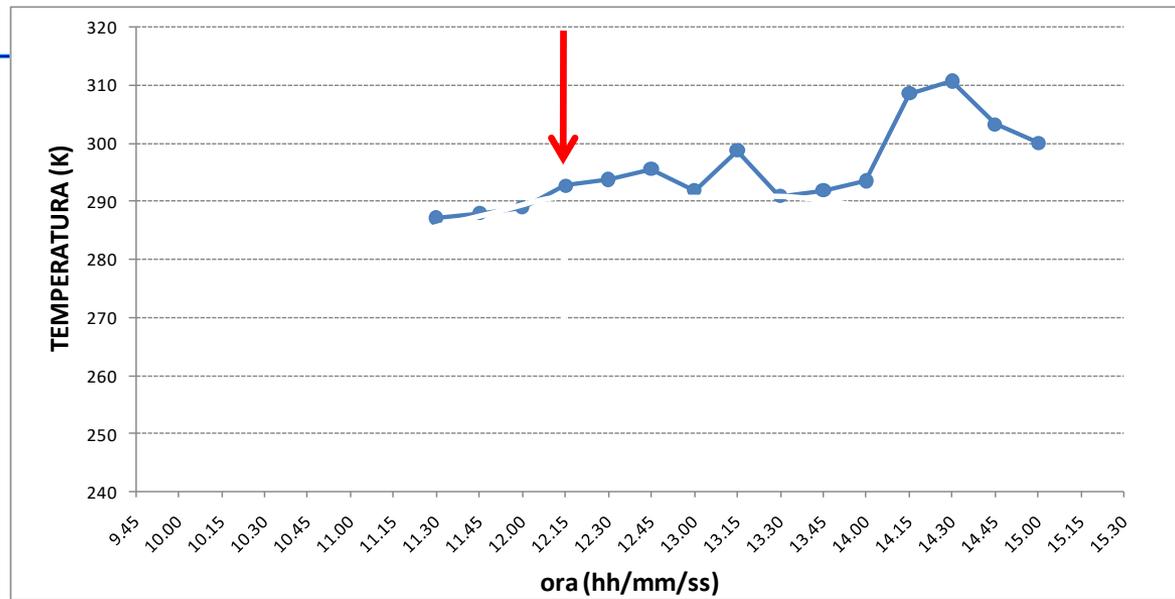


**Conosciamo la «storia» termica di quel pixel sulla base di immagini NOAA-AVHRR acquisite negli ultimi 40 anni**

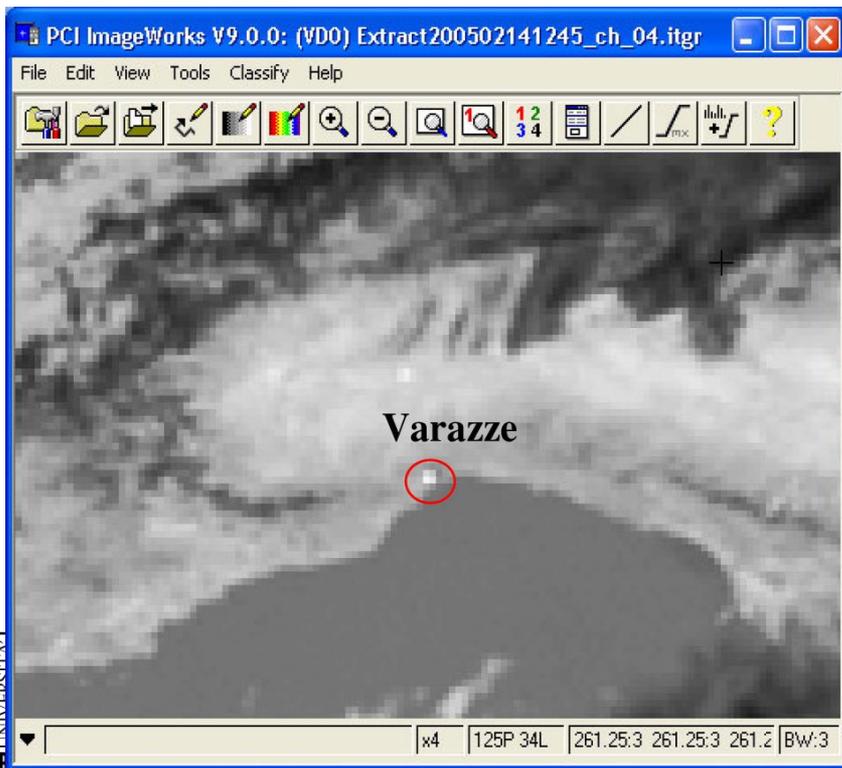
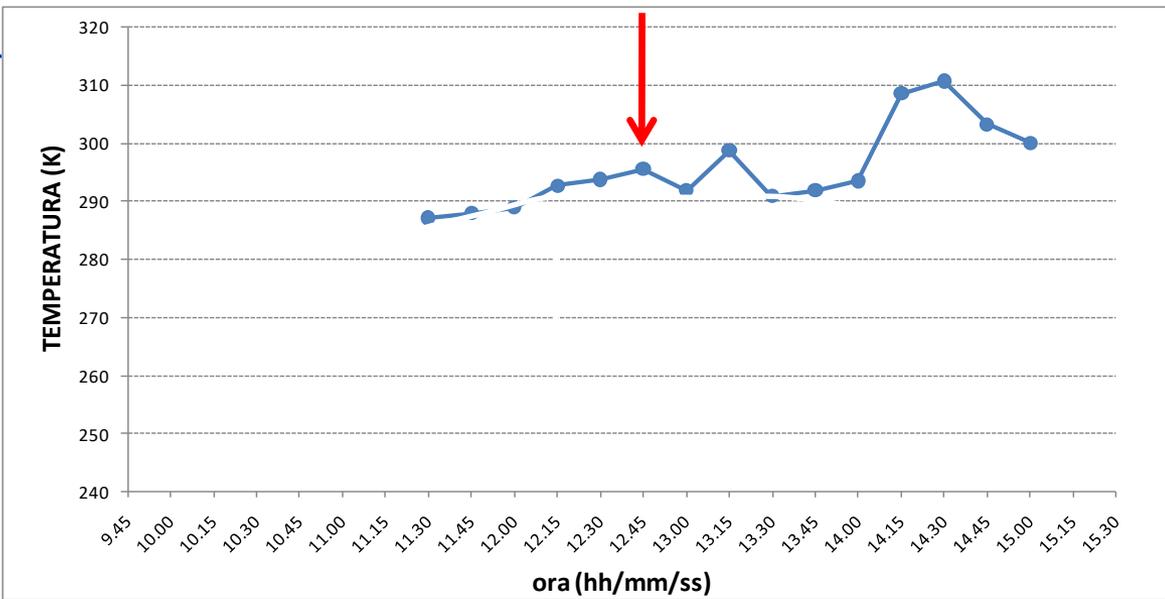
# Early detection



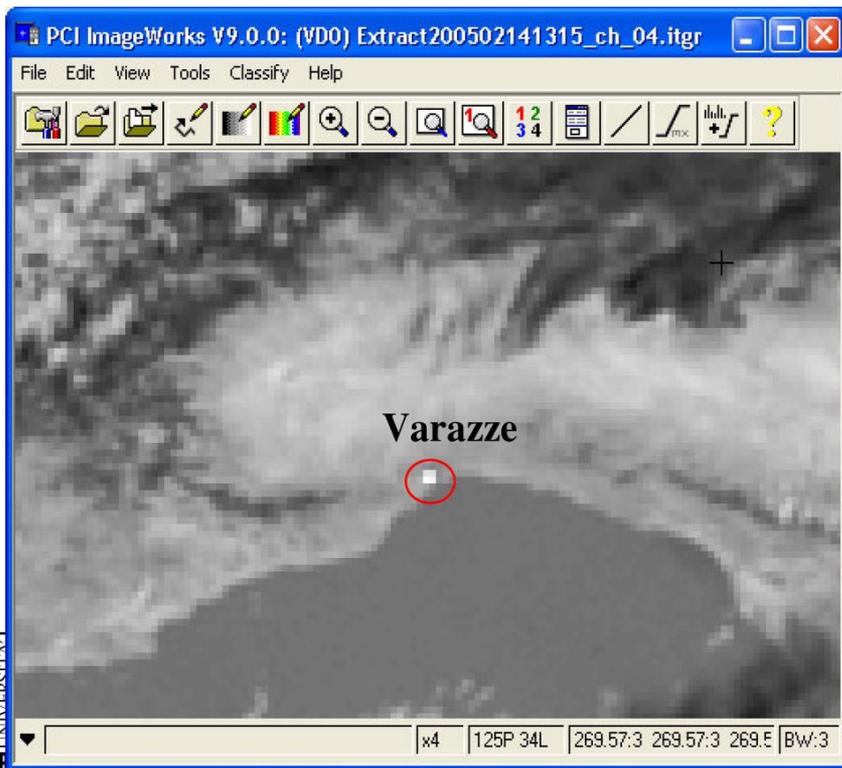
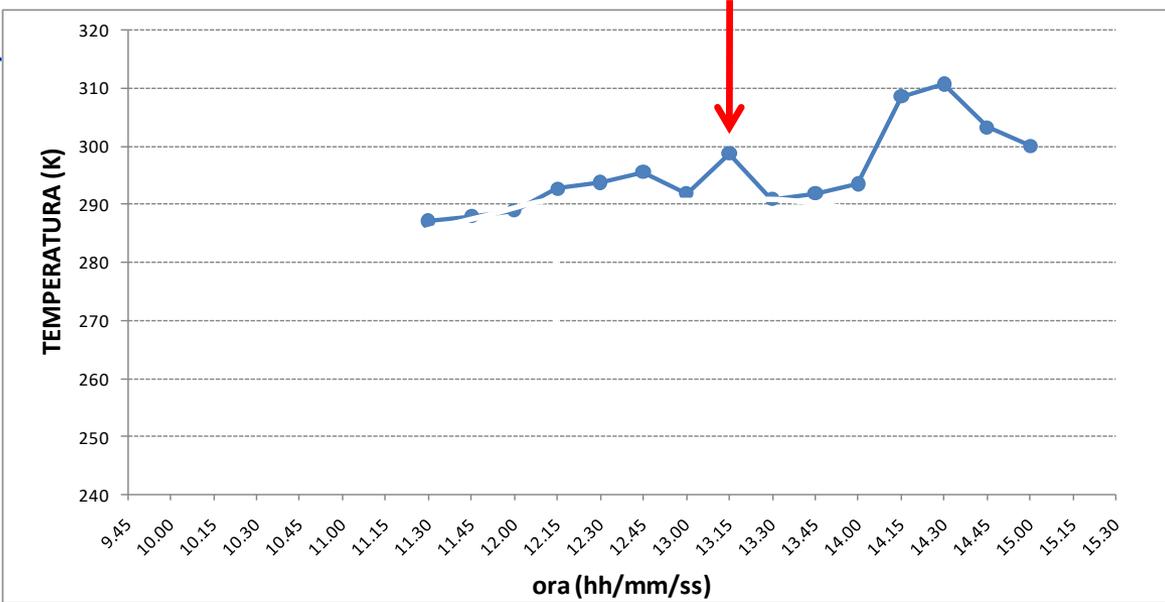
# Early detection



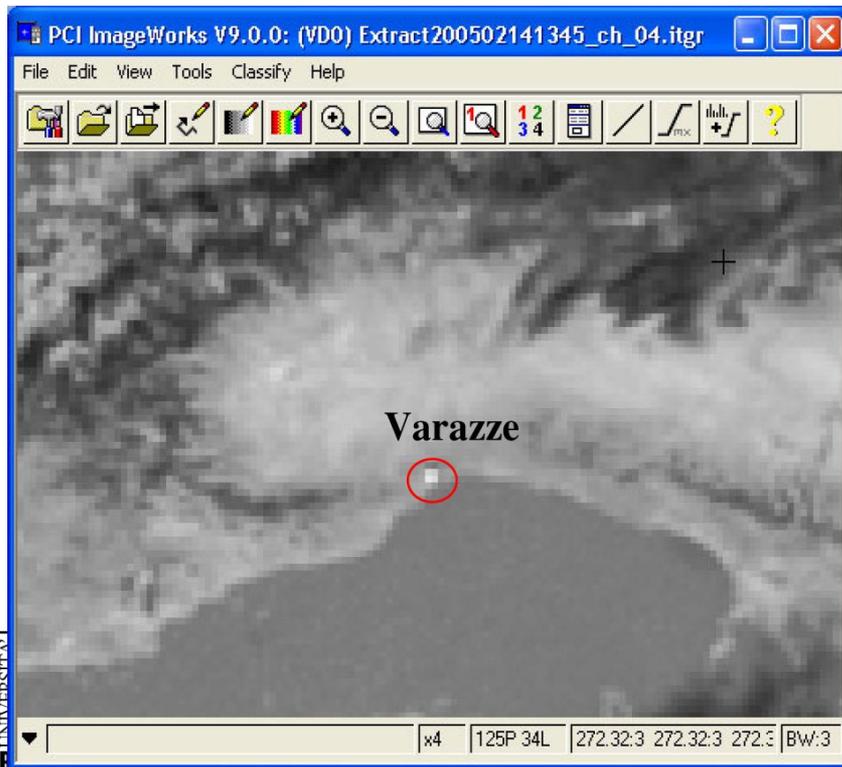
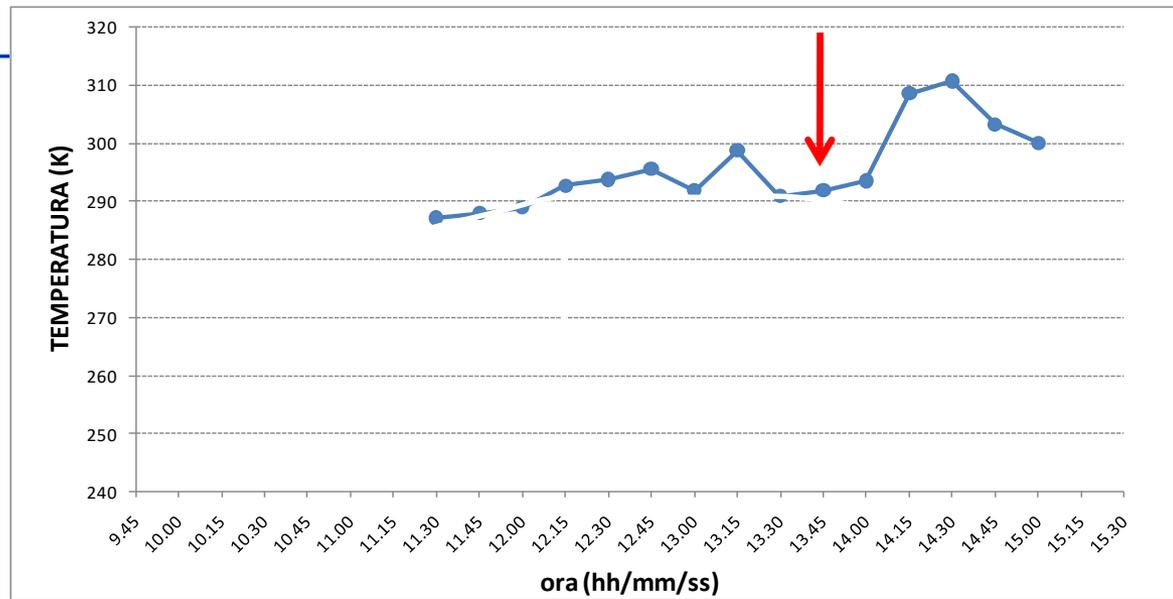
# Early detection



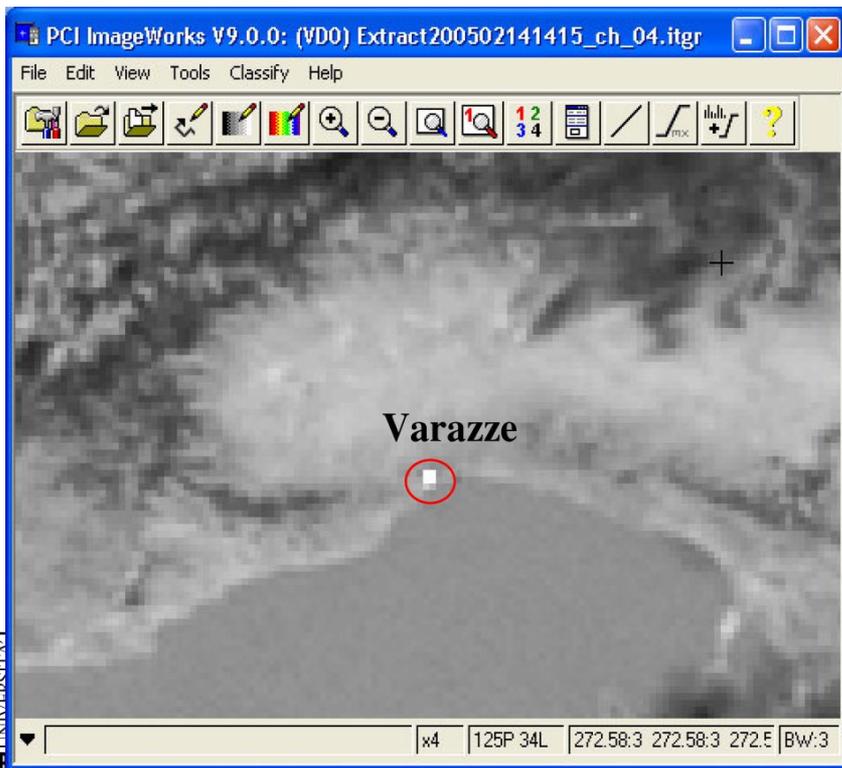
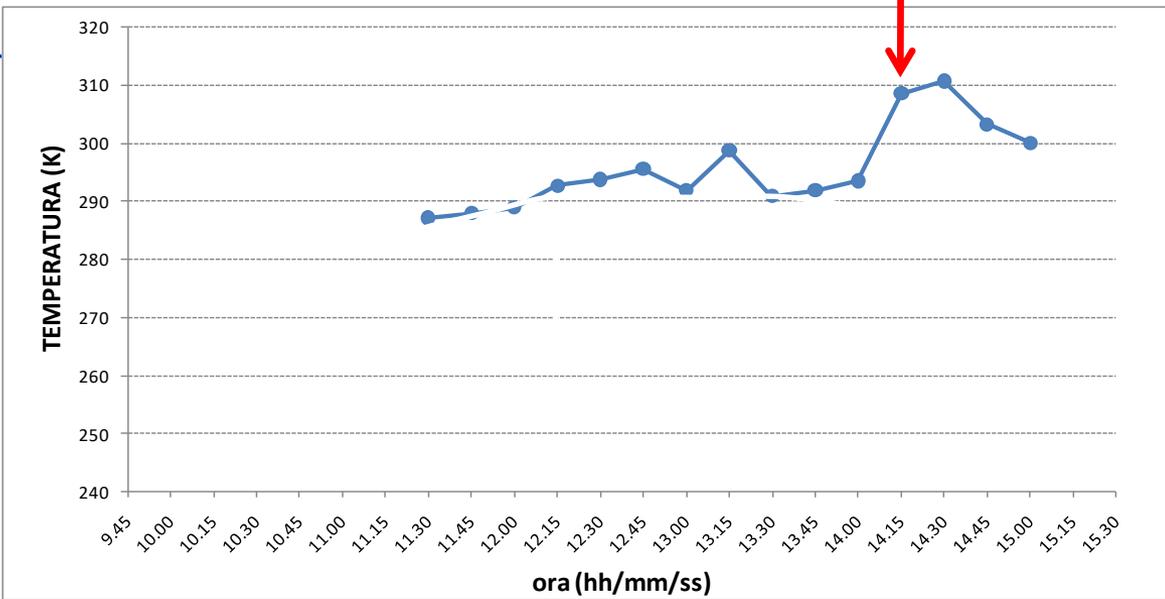
# Early detection



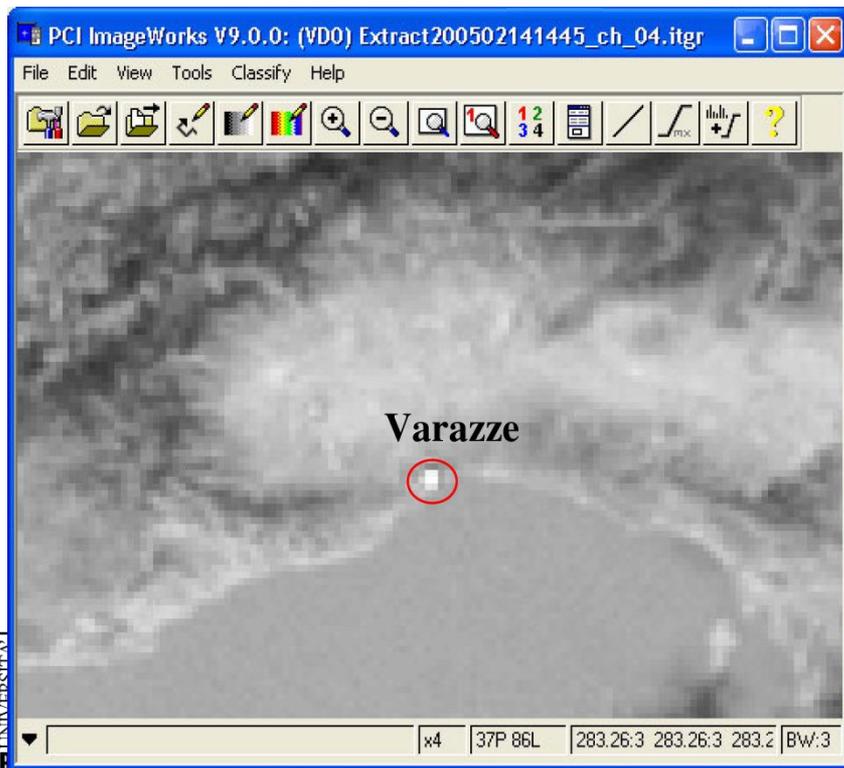
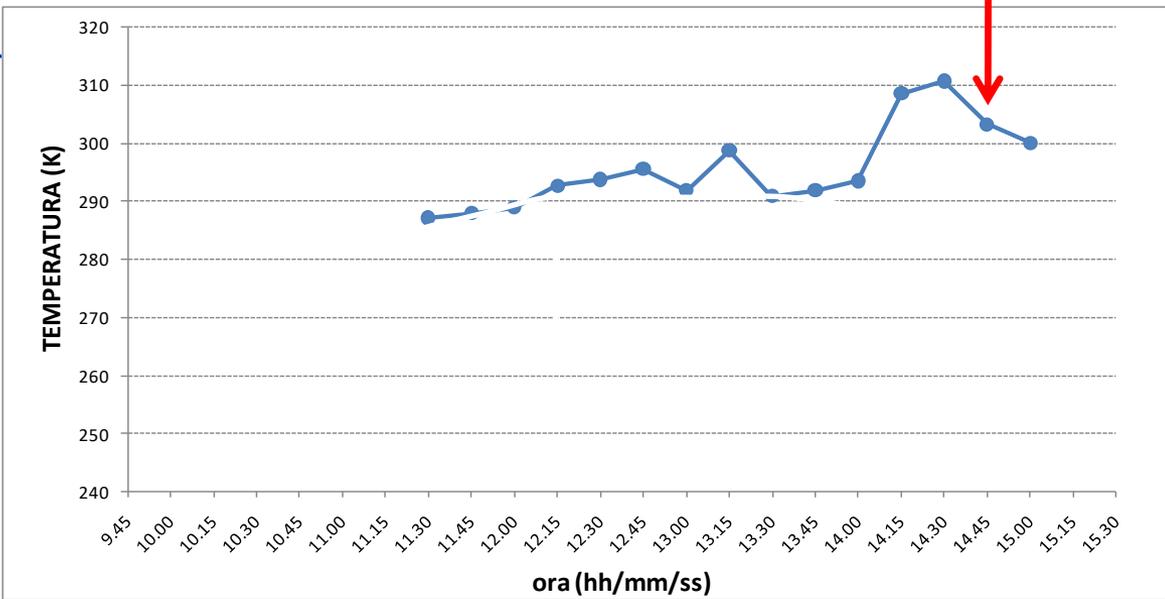
# Early detection



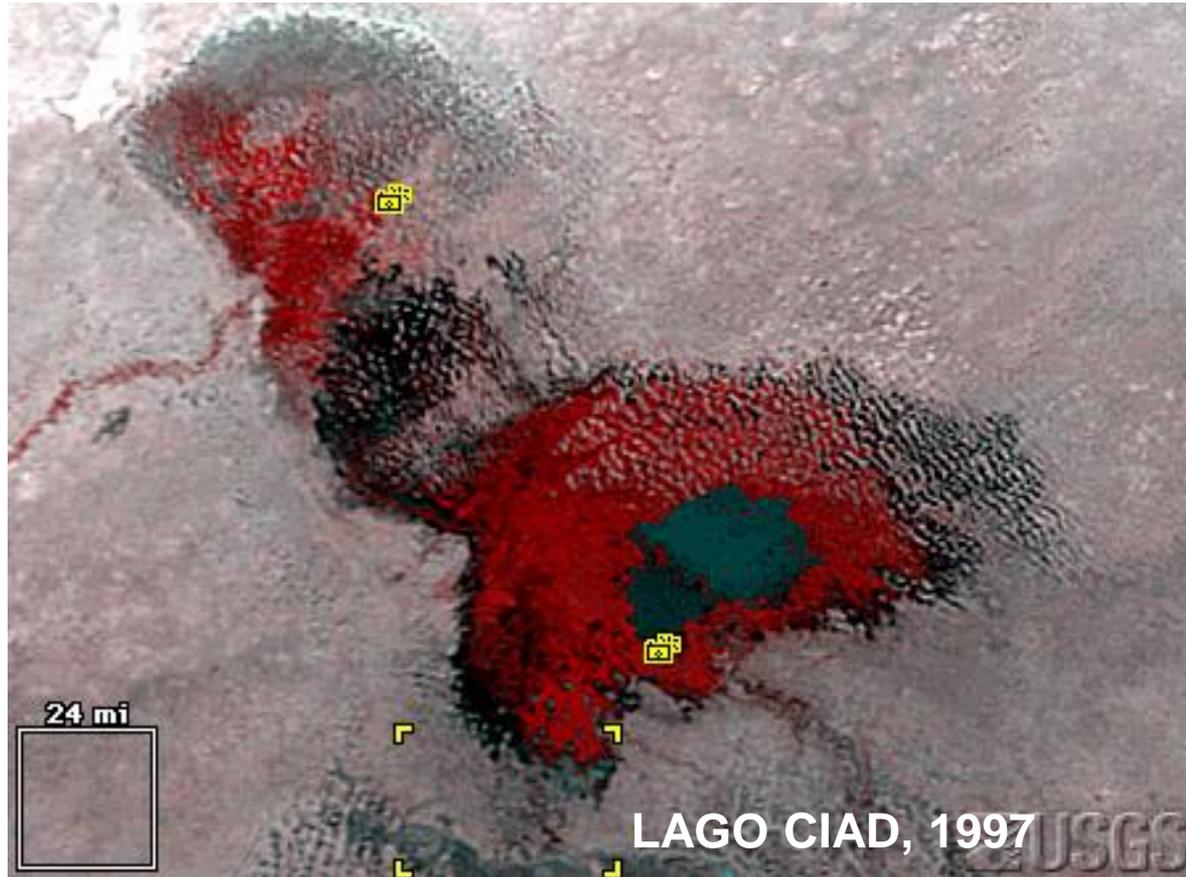
# Early detection



# Early detection

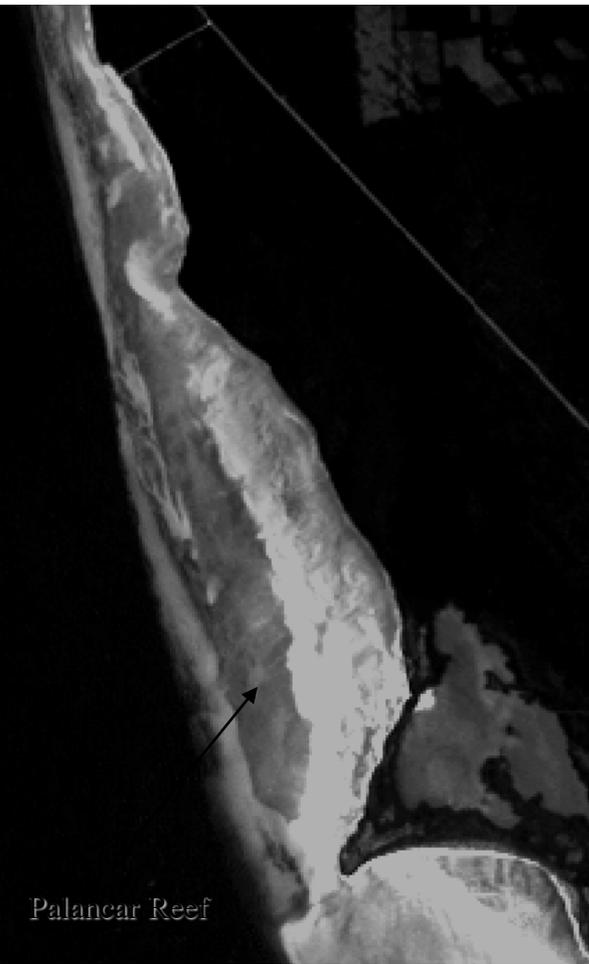


## ➤ Monitoraggio della vegetazione: Studio della desertificazione

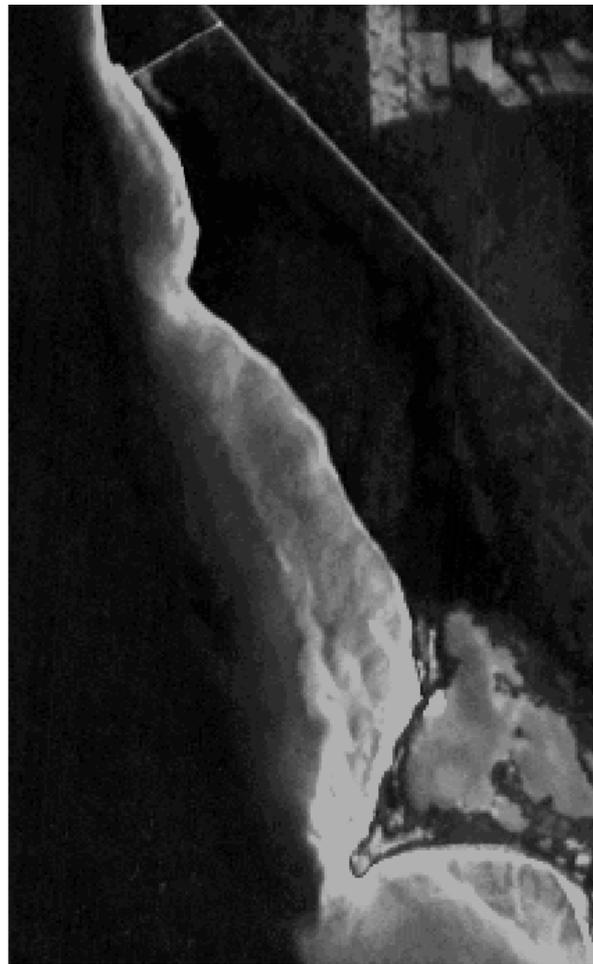


**Variazione dell'estensione del Lago Ciad  
(Africa)**

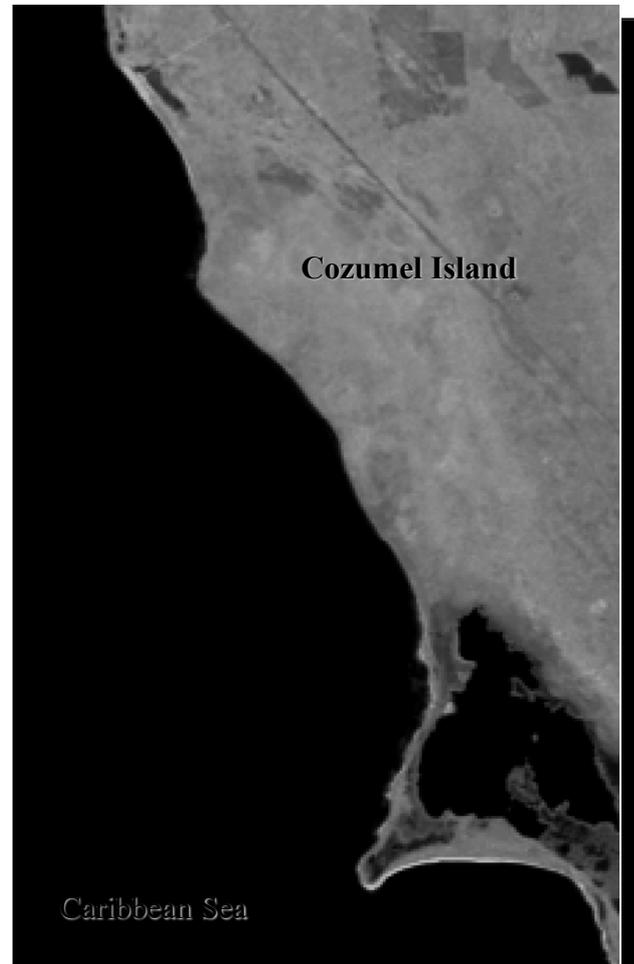
# Water penetration



SPOT Band 1 (0.5 - 0.59  $\mu\text{m}$ ) green

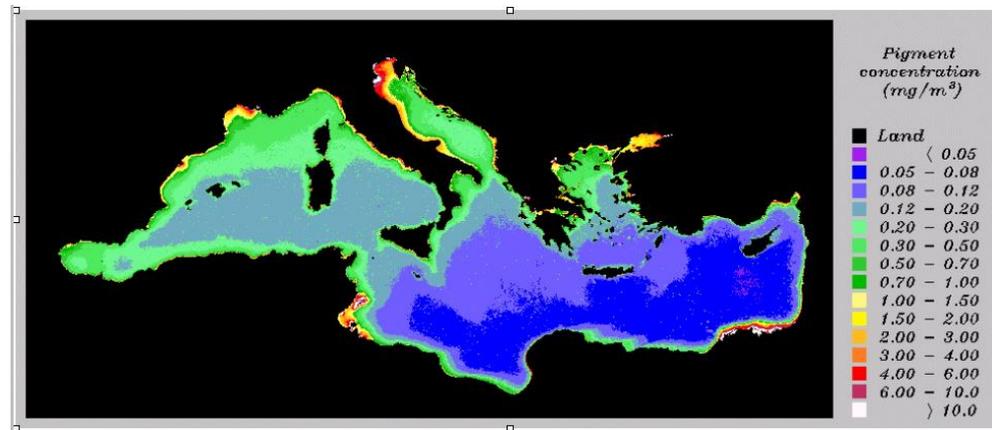
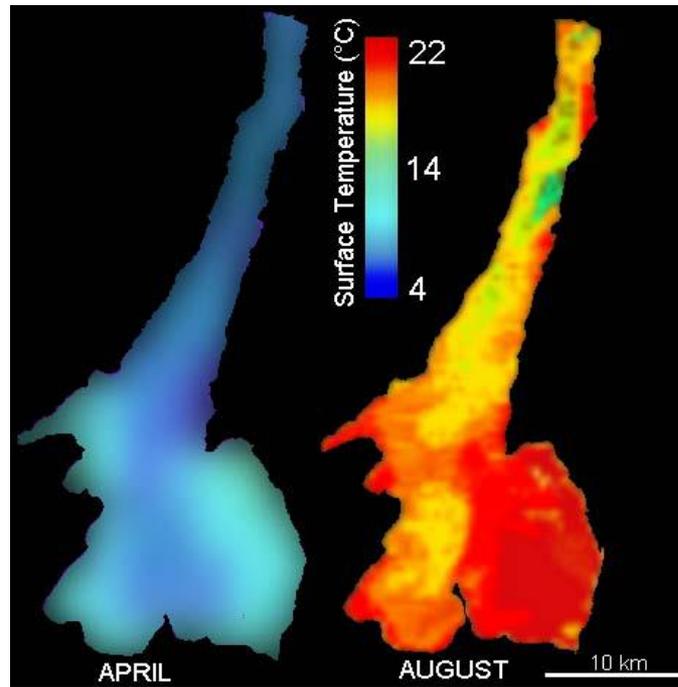
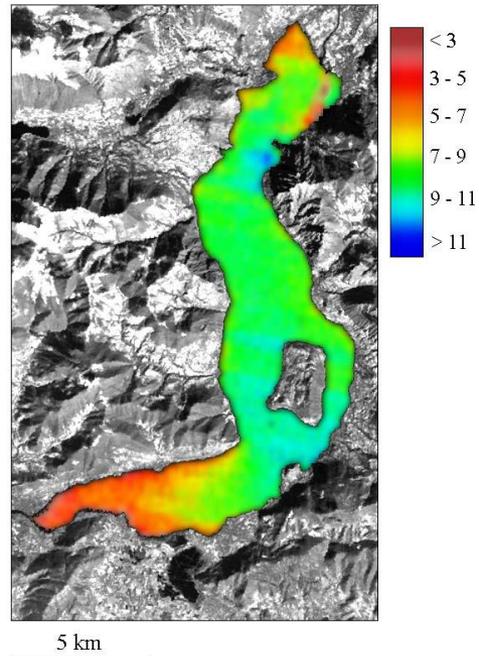


SPOT Band 2 (0.61 - 0.68  $\mu\text{m}$ ) red

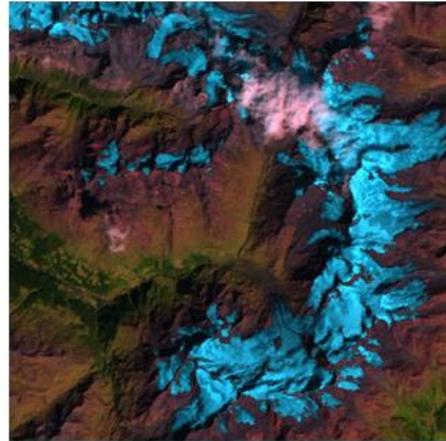


SPOT Band 3 (0.79 - 0.89  $\mu\text{m}$ ) NIR

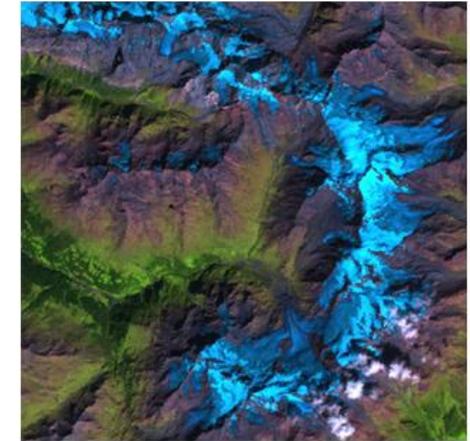
# Mappe di parametri di qualità delle acque



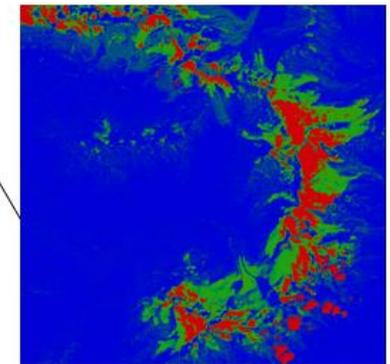
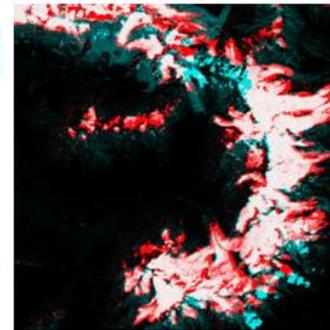
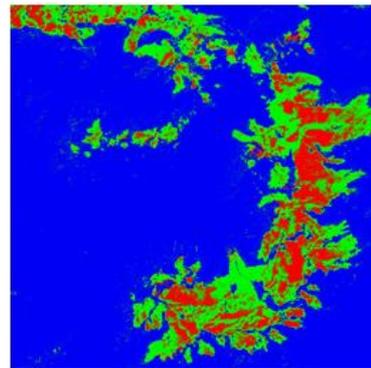
## ➤ Variazioni nell'estensione dei ghiacciai



LANDSAT 5 12 SEP 90



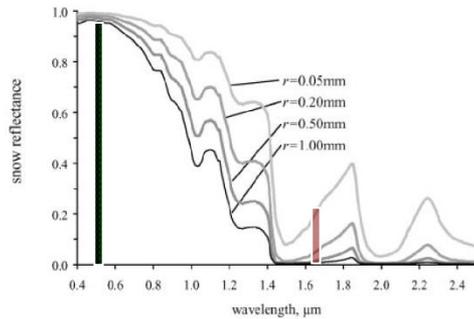
LANDSAT 7 13 SEP 99



**Variazione dell'estensione del ghiacciaio dell'Ortles  
Cevedale tra il 1990 e il 1999**

# Snow cover mapping and monitoring

- Snow vegetation indices

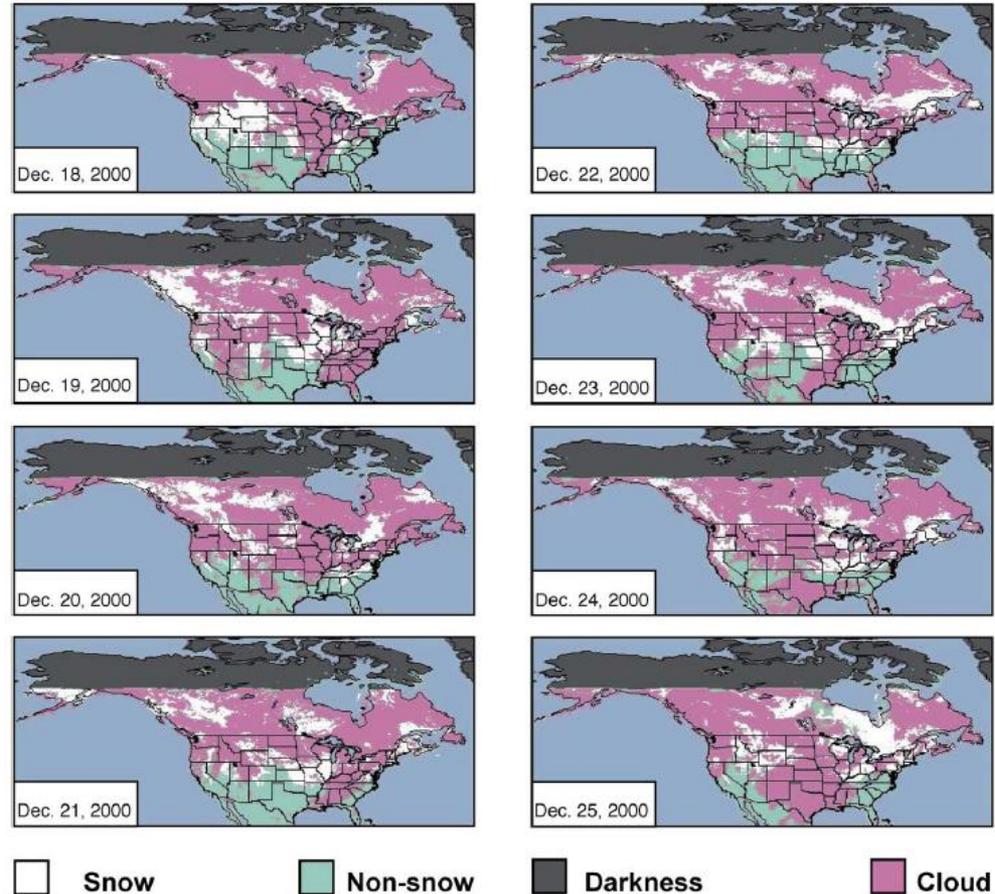


## NDSI (Normalised Snow Spectral Index)

$$NDSI = \frac{\rho_{MODIS_{b4}} - \rho_{MODIS_{b6}}}{\rho_{MODIS_{b4}} + \rho_{MODIS_{b6}}}$$

$\rho_{MODIS_{b4}}$  (0.545–0.565  $\mu\text{m}$ ) green,  
 $\rho_{MODIS_{b6}}$  (1.628–1.652  $\mu\text{m}$ ) middle infrared

Threshold application on NDSVI and  $\rho_2$



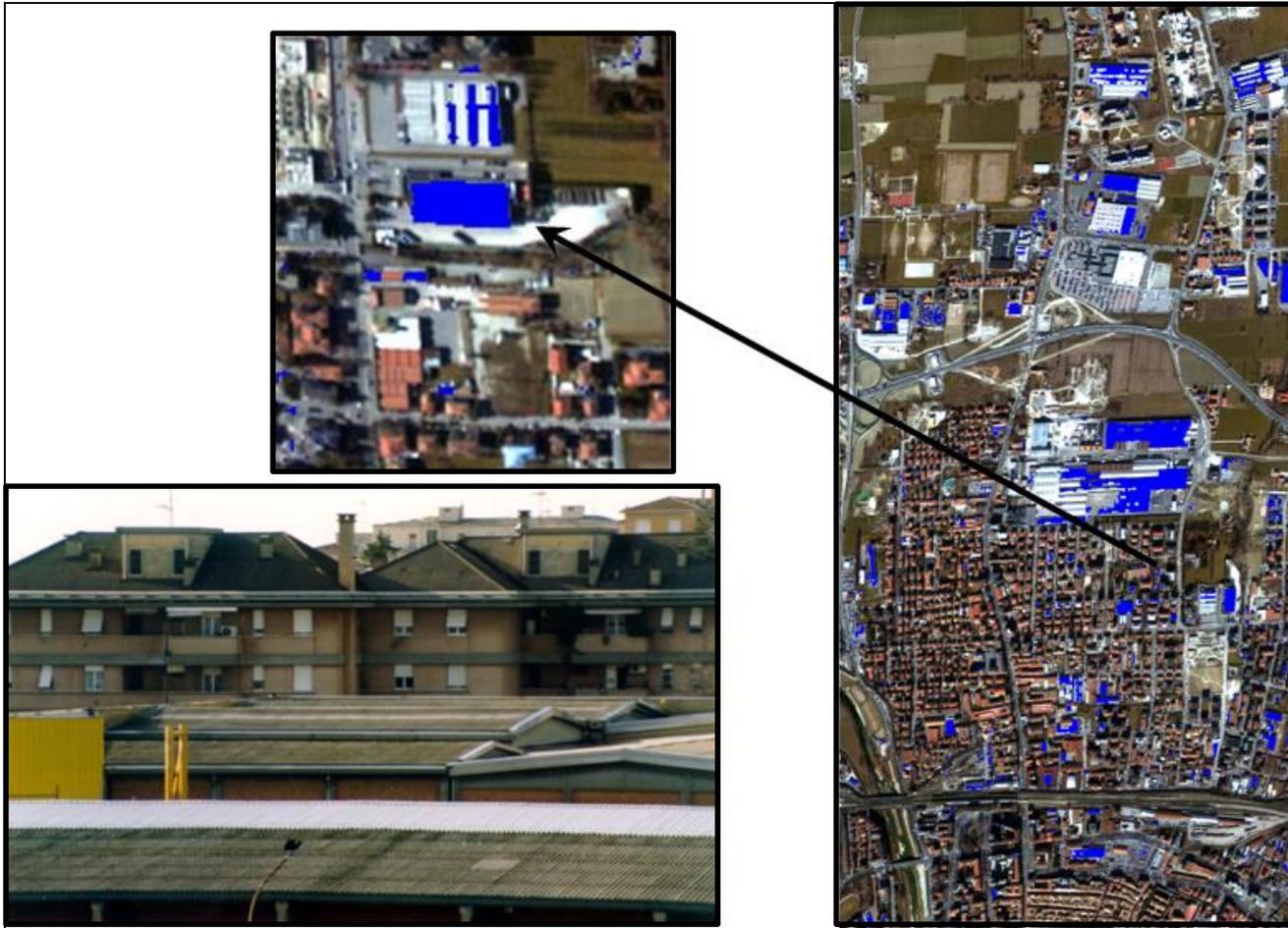
Hall et al., (2002)

---

Video

<https://archive.org/details/SVS-2484>

## ➤ Identificazione di particolari tipologie di superficie

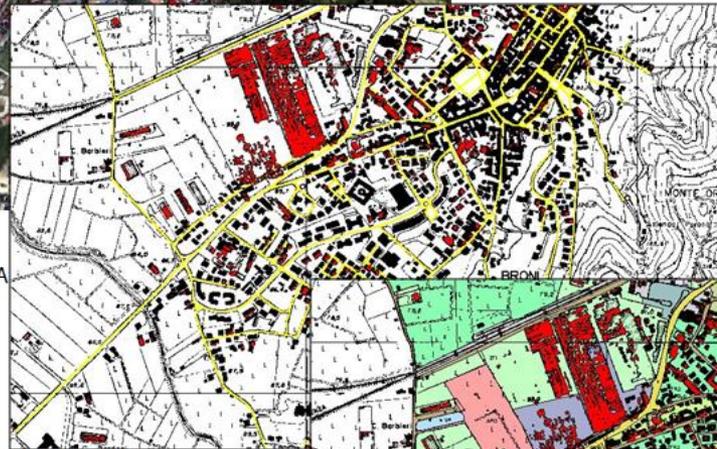


**Identificazione dei tetti in Eternit (Cemento-Amianto) a partire da immagini aeree**

## ➤ Identificazione di particolari tipologie di superficie

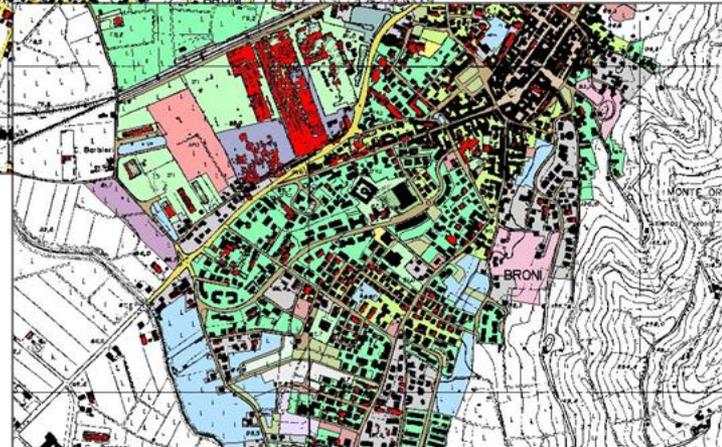


Immagine MIVIS,  
Sintesi RGB, bande 10-6-1  
In rosso le coperture in CA



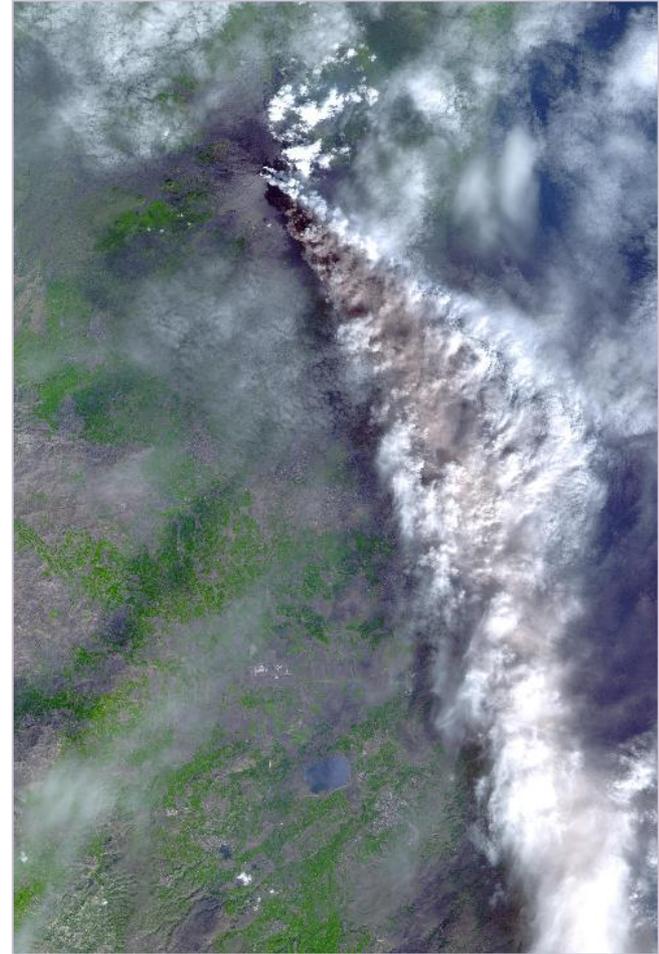
CTR 1:10.000,  
Piano Regolatore Generale,  
in rosso coperture CA

CTR 1:10.000,  
in giallo sistema viario,  
in rosso coperture CA



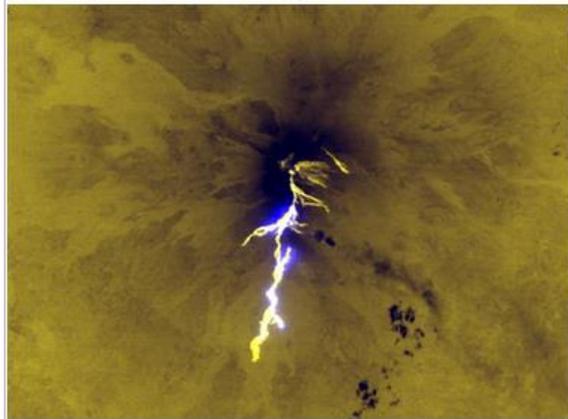
**Identificazione dei tetti in Eternit (Cemento-Amianto) a partire da immagini aeree**

## ➤ Gestione delle emergenze: Monitoraggio dei vulcani



**Eruzione dell'Etna – Novembre 2002**

## ➤ Gestione delle emergenze: Monitoraggio dei vulcani



**Eruzione dell'Etna – Novembre 2002**

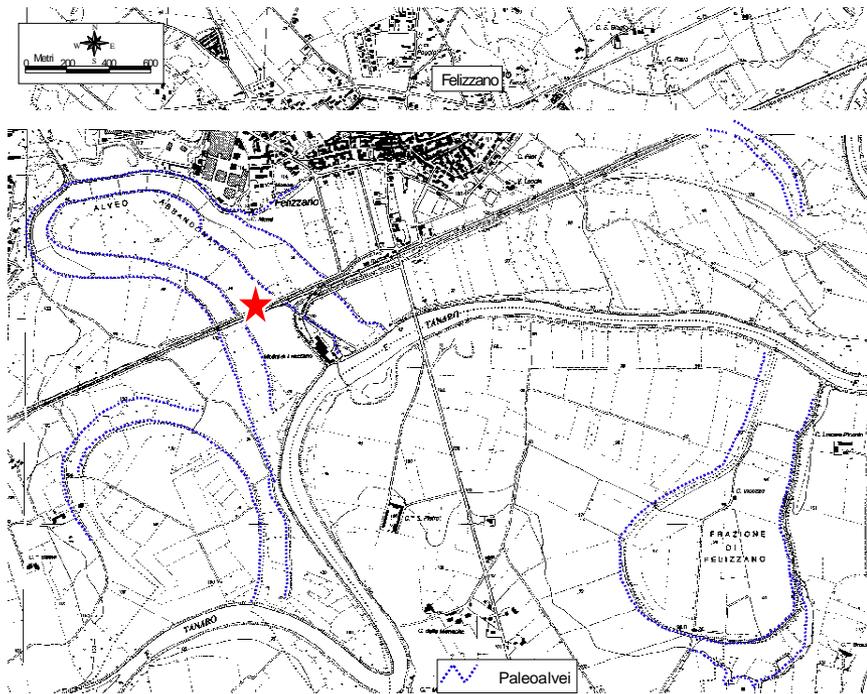
## ➤ Paleoalvei e fasce di rispetto. Consumo di suolo!



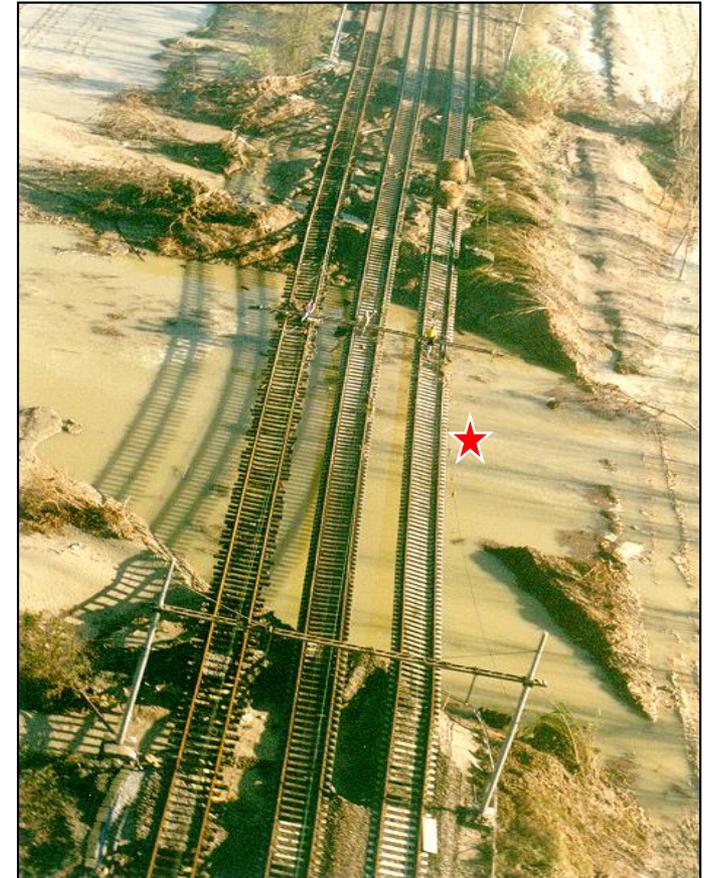
SPOT P image 01/04/1997

Liceo Manzoni, 22 Settembre 2021

## ➤ Paleoalvei e fasce di rispetto. Consumo di suolo!



## *RAILWAYS DAMAGE*



$$f(\mathbf{A}, v, t, h, T_r, \mathbf{C}, d)$$

$\mathbf{A}$  = extent of the flood affected area

$v$  = rate of increase of area in time

$t$  = time number of days of submer

$h$  = depth of inundation

$T_r$  = return period of the flooding

$\mathbf{C}$  = standing crop area affected and

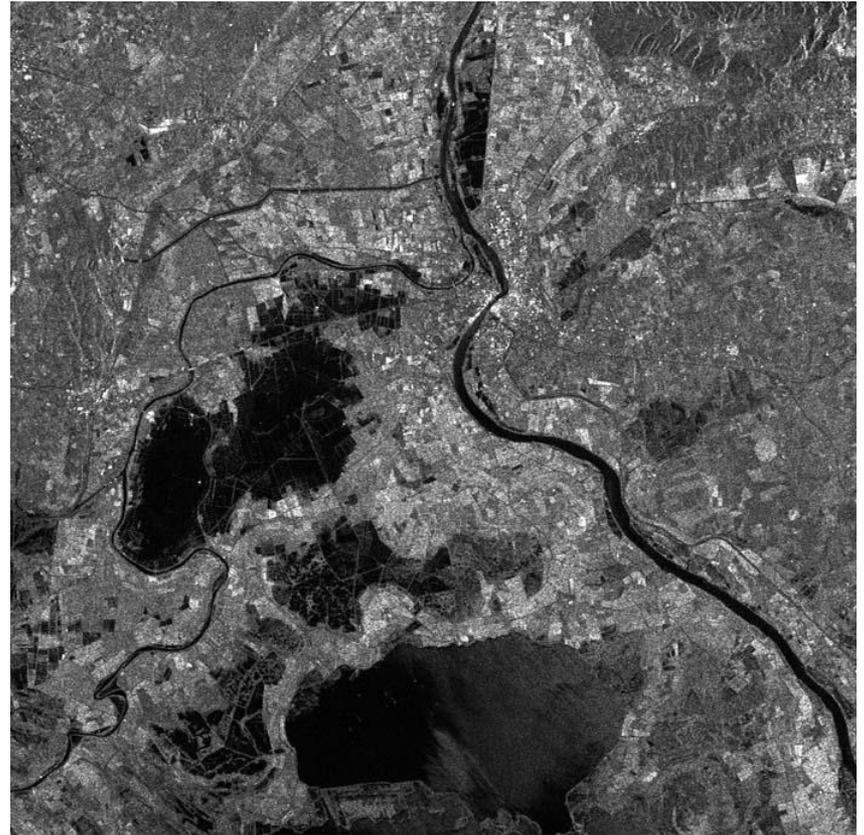
$d$  = non-physical damage



## Flooded areas in radar images



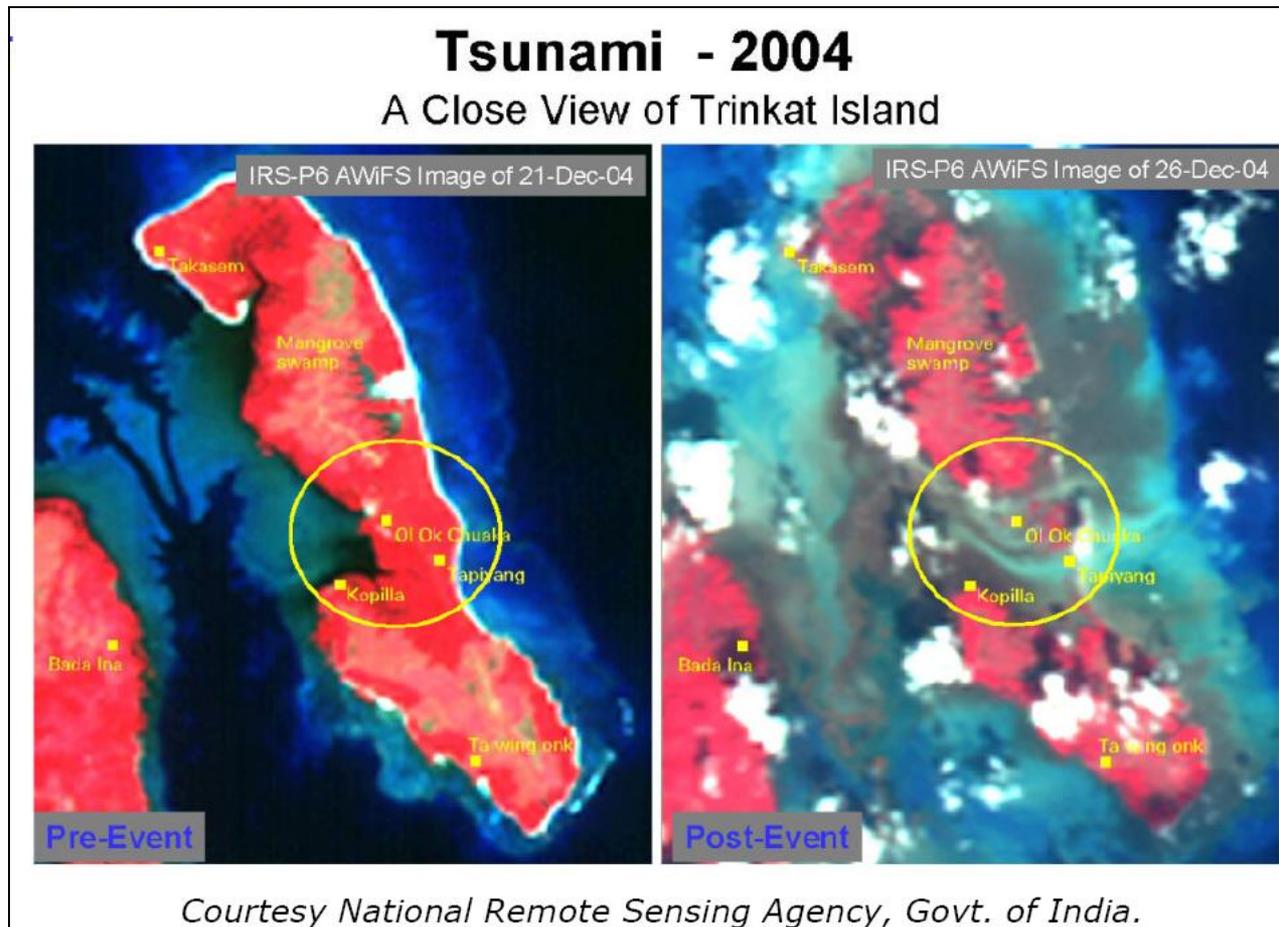
ERS-1; 3 January 1994



ERS-1; 12 January 1994

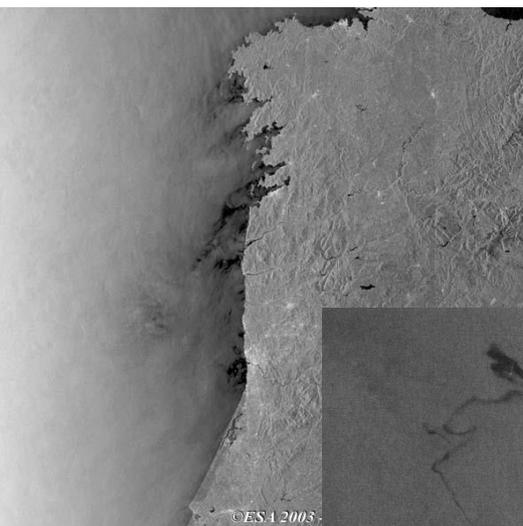
Rhine River (Camargue, France)

## ➤ Gestione delle emergenze: Lo Tsunami del dicembre 2004

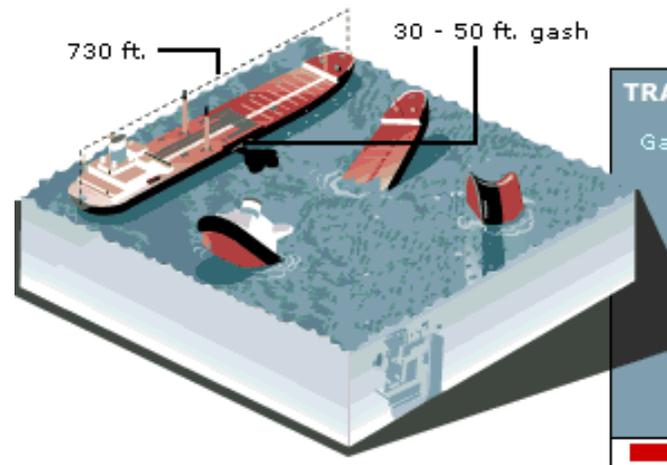


**Immagini anche a basso dettaglio, se elaborate rapidamente, consentono una prima stima dei danni e l'individuazione rapida delle aree in cui intervenire**

# INQUINAMENTO MARINO DA IDROCARBURI

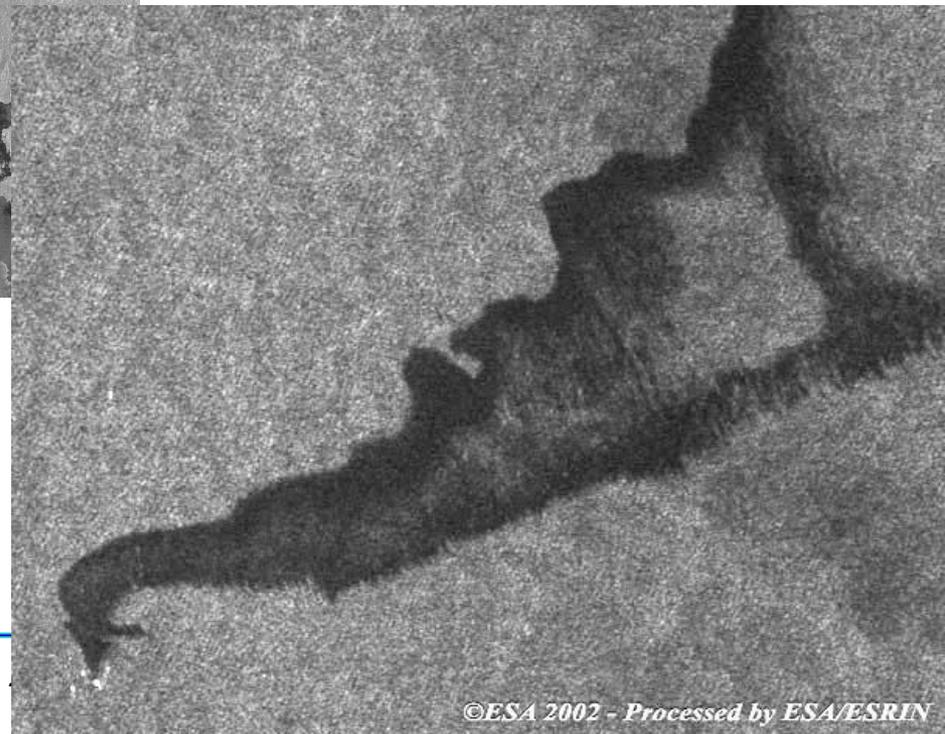


- **Nov. 13:** Tanker hull ruptures, leaking 1.3 million to 2.6 million gallons of fuel oil.



©ESA 2002 - Processed by ESA/ESRIN

- **Nov. 19:** Tanker breaks in two; stern section sinks still holding more than 20 million gallons of fuel oil.



©ESA 2002 - Processed by ESA/ESRIN

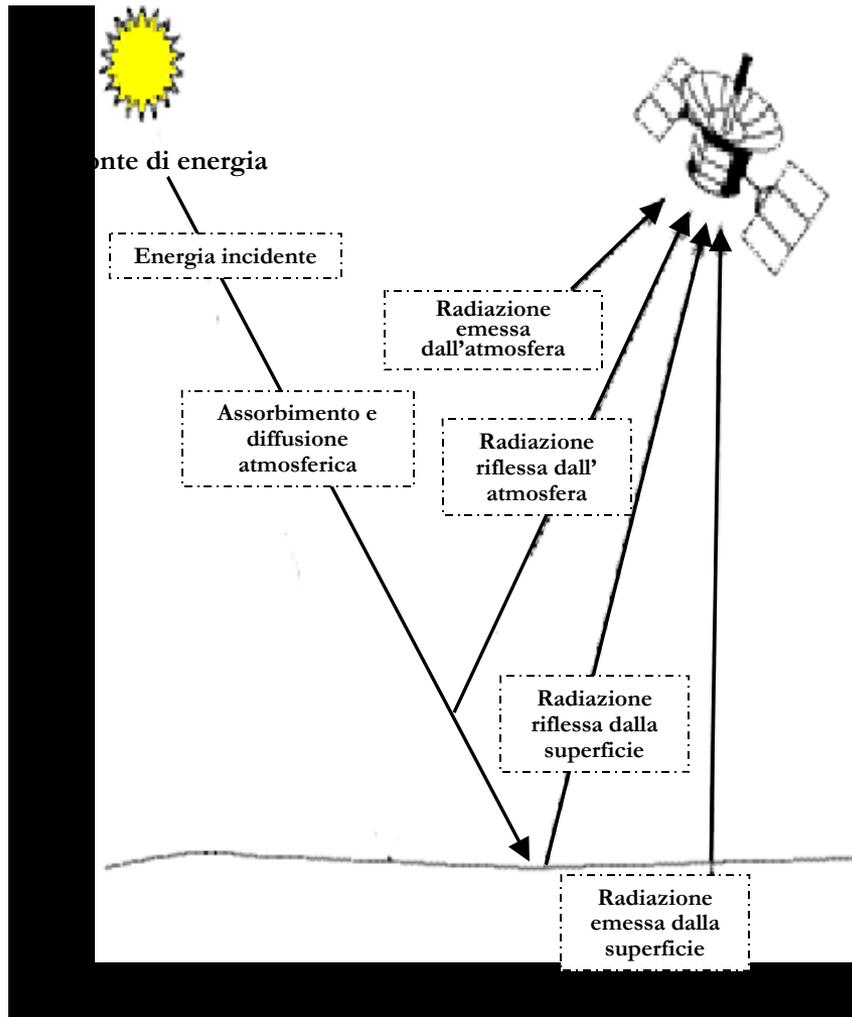
# Concludendo....

- ✓ *Le tecniche di Telerilevamento sono un'importante strumento ai fini del monitoraggio ambientale, poiché permettono di ricavare informazioni frequenti e a differenti scale di osservazione sulla copertura/uso del suolo e su numerosi processi fisico-ambientali.*
- ✓ *Il continuo sviluppo tecnologico (miglioramento dei sensori, aumento della potenza degli elaboratori, etc) sta favorendo una forte espansione di questa disciplina, ampliandone i possibili campi di applicazione al di là di quanto ci si sarebbe potuti aspettare soltanto pochi anni fa!*

---

# Radiazione EM e regioni spettrali

## Che cosa misura un sistema di telerilevamento (esempio di un sistema satellitare passivo, riflesso/emesso)



- Il  **sensore**  raccoglie la radiazione EM riflessa o emessa dalla superficie e quella riflessa o emessa dall'atmosfera;
- L'**atmosfera** può assorbire e diffondere la radiazione solare, modificando sia la radiazione incidente sulla superficie, sia quella che raggiunge il sensore;
- **L'intensità della radiazione** riflessa o emessa dalla superficie dipende dalle caratteristiche della superficie e dalla lunghezza d'onda;

# Natura e proprietà delle onde elettromagnetiche

*La radiazione elettromagnetica è il mezzo che trasporta le informazioni*

La **RADIAZIONE ELETTROMAGNETICA** consiste di un campo elettrico (**E**) che varia in ampiezza nella direzione perpendicolare alla direzione di propagazione del campo magnetico (**M**).

*Entrambi i campi viaggiano alla velocità della luce ( $c$ )*

## Parametri dell'onda EM

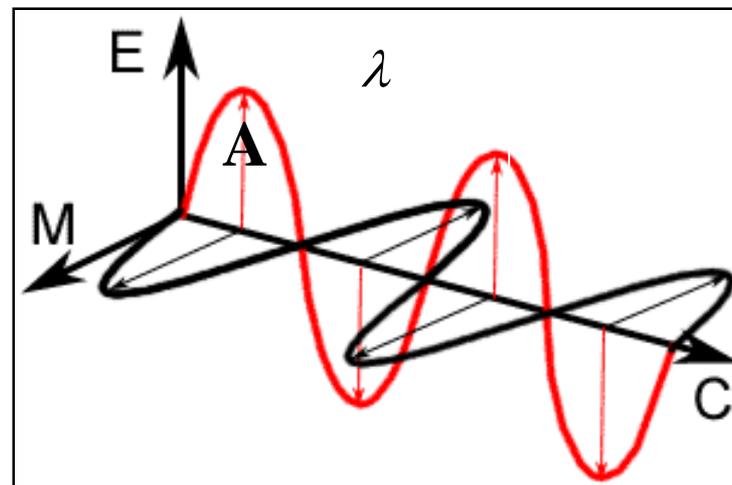
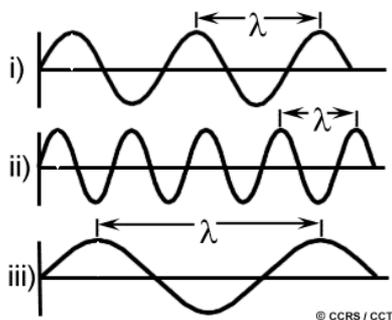
$\lambda$  = lunghezza d'onda (m)

$f$  = frequenza (cicli al secondo,  $s^{-1}$  oppure Hz)

$a$  = ampiezza, intensità massima di  $E$   
(Irradianza in  $W/m^2$ )

$c$  = velocità di propagazione (m/s)

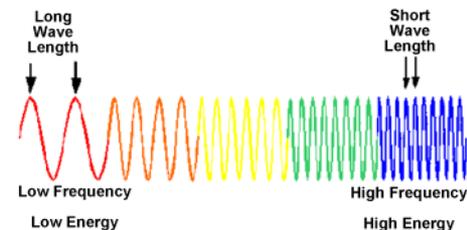
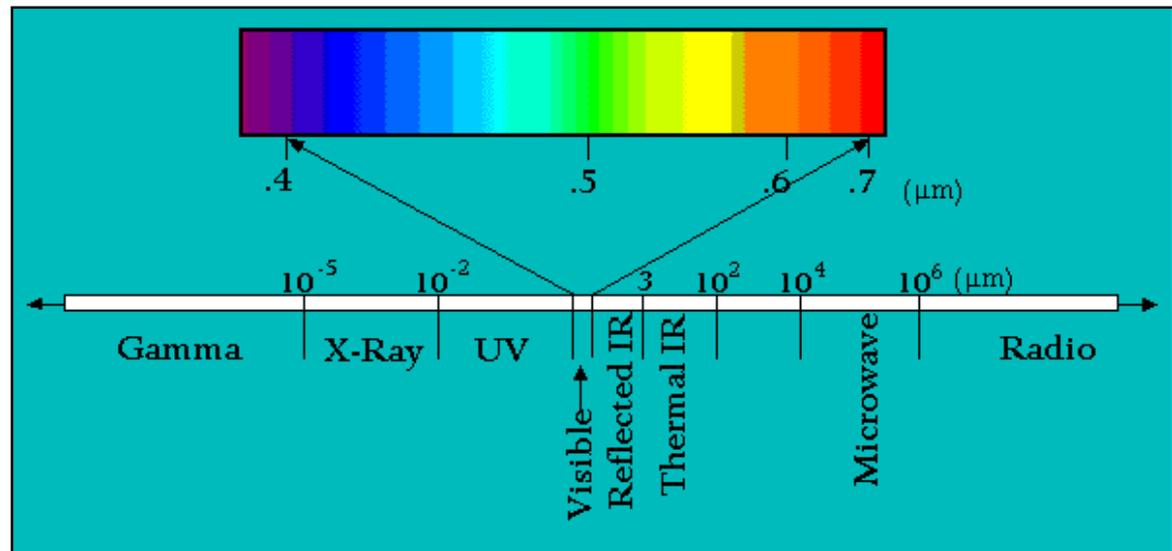
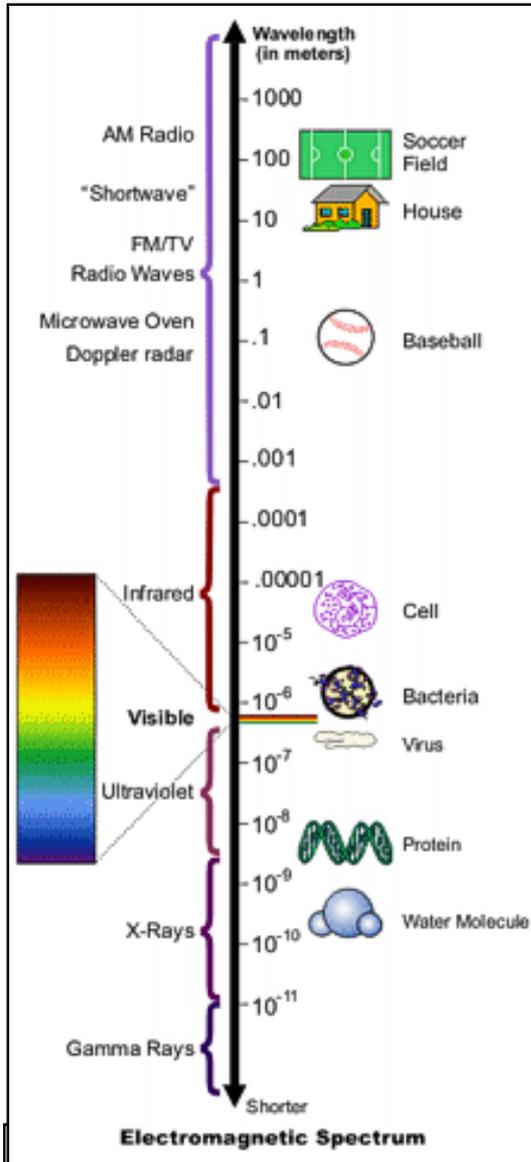
$T$  = periodo (tempo di una oscillazione,  $1/f$ )



Si tratta pertanto di un fenomeno ondulatorio dato dalla propagazione in fase del campo  $E$  e del campo  $M$ , oscillanti in piani tra loro ortogonali e ortogonali alla direzione di propagazione. Tale fenomeno è descritto matematicamente come soluzione dell'equazione delle onde, ottenuta a partire dalle equazioni di Maxwell (1864)

# Lo spettro elettromagnetico

- E' la distribuzione monodimensionale continua dell'energia EM ordinata normalmente per  $\lambda$  crescenti. E' l'intervallo di tutte le possibili frequenze della radiazione EM;
- Lo studio delle caratteristiche di una determinata superficie avviene analizzando la radiazione da essa riflessa o emessa in differenti lunghezze d'onda, in vari domini dello spettro elettromagnetico.



# Leggi della radiazione EM di interesse per il remote sensing

- **3 leggi** fondamentali della radiazione di interesse per il telerilevamento:

1. **Legge di Planck**, che descrive l'andamento della potenza emessa dalle superfici in funzione della lunghezza d'onda e della loro temperatura.

2. **Legge di Stefan - Boltzmann**, che fornisce la quantità totale di potenza emessa dalle superfici calcolata su tutto lo spettro in funzione della loro temperatura.

3. **Legge di Wien**, che indica il valore della lunghezza d'onda ove l'emissione elettromagnetica è massima per una certa temperatura.

**Principio di conservazione dell'energia - Kirchhoff**

# Emissione di onde elettromagnetiche: legge di Planck

- Max Planck nel 1900 enunciò la legge generale dell'emissione elettromagnetico per corpi neri
- La legge è basata sulla teoria quantistica e Spiega/calcola la densità di flusso radiante spettrale
- Si usa per predire quanta energia è presente tra determinate  $\lambda$ : permette di calcolare per unità di superficie e di lunghezza d'onda ( $\lambda$ ) la densità di flusso radiante spettrale (o emittanza) emessa da un corpo nero

$$W_{\lambda} = \frac{2\pi c^2 h \lambda^{-5}}{e^{ch/\lambda k T} - 1} \quad [W \, m^{-2} \, \mu m^{-1}]$$

*dipendenza da T*

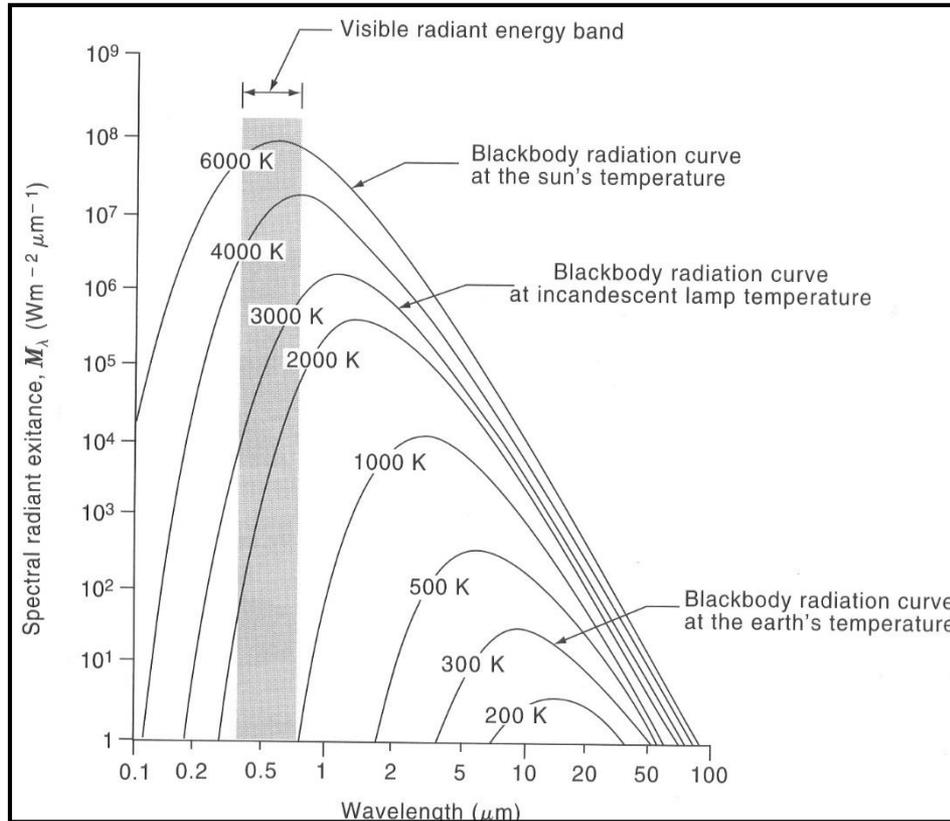
*dipendenza da  $\lambda$*

*potenza radiante (per unità di sup e lunghezza d'onda)*

- Qualunque superficie esterna di un corpo nero con temperatura superiore allo zero assoluto ( $0^{\circ}$  K) emette radiazioni elettromagnetiche in maniera continua su tutto lo spettro elettromagnetico, in accordo con la legge di Planck

# Legge di Planck

## Curve di Planck per corpi neri a diversa $T$ ( $\epsilon = 1$ )

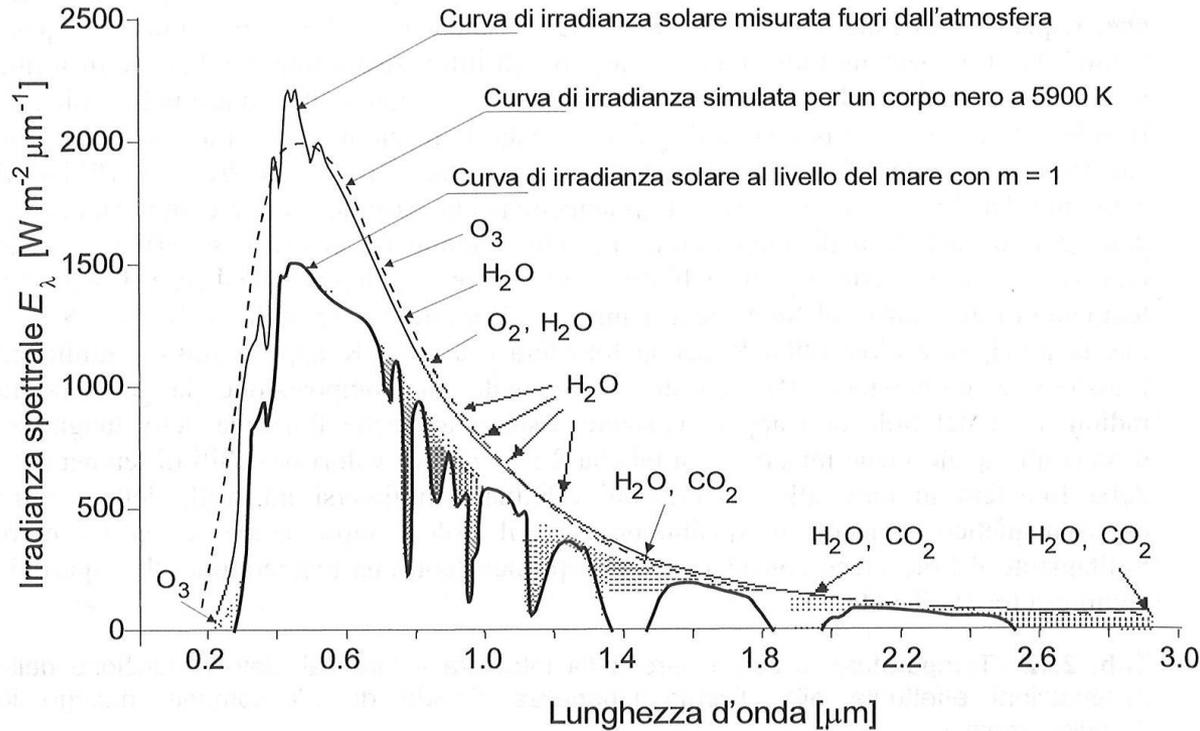


1. L'energia totale irradiata cresce al crescere della *Temperatura*;
2. Permette di calcolare l'energia irradiata per ciascuna  $\lambda$
3. Al crescere di  $T$  il massimo della curva si sposta a *lunghezza d'onda* minori secondo la legge di Wien

# Curva di emissione del sole

sole assimilato a un corpo nero con  $T =$

**5900 K** curva reale di irraggiamento



**Interazione con i gas in atmosfera**

## Sorgenti di onde elettromagnetiche nell'osservazione della terra

**Sole:**

$$T_{\text{media}} = 6000 \text{ °K (5727°C)}$$

Picco di emissione nel visibile

$$\lambda_{\text{max}} = 0.482 \text{ } \mu$$

**Terra:**

$$T_{\text{media}} = 300 \text{ °K (27°C)}$$

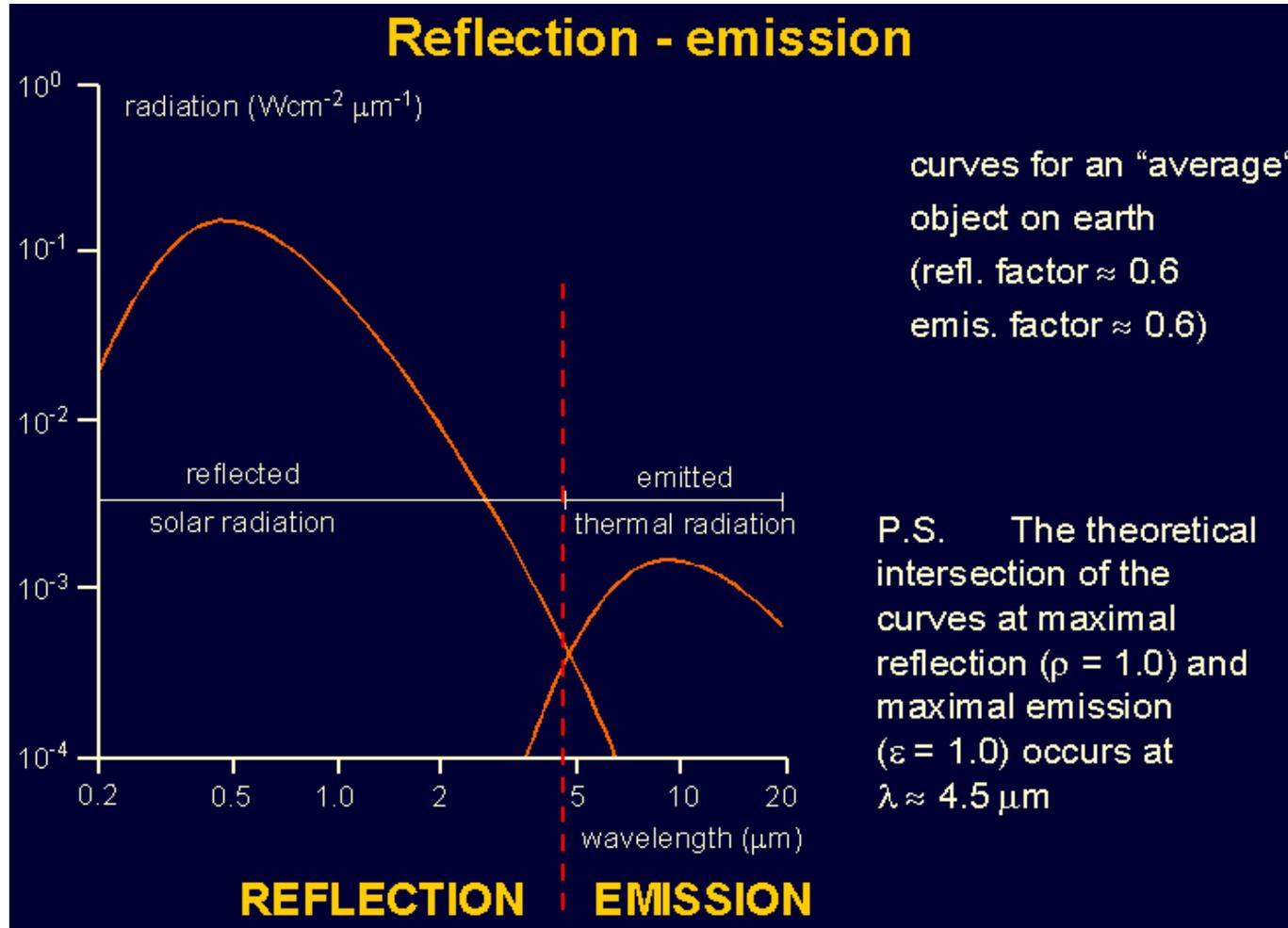
Picco di emissione nell'IR termico

$$\lambda_{\text{max}} = 9.7 \text{ } \mu$$

Dal punto di vista dell'irraggiamento queste due sorgenti si comportano in modo diverso a causa della diversa T!

Volendo misurare la radiazione solare RIFLESSA da una superficie, si utilizzeranno sensori sensibili alle radiazioni nel campo del visibile e dell'infrarosso vicino e a onde corte (NIR e SWIR), mentre volendo misurare la radiazione EMESSA da una superficie, si utilizzeranno sensori sensibili alle radiazioni nel campo dell'infrarosso termico (TIR)!

# Emissione di onde elettromagnetiche



Nell'intervallo 3 – 6  $\mu\text{m}$  in l' energia solare riflessa dalla terra e quella emessa sono confrontabili. Per questo motivo generalmente i sensori per telerilevamento non misurano in tale intervallo spettrale

# Simbologia impiegata nei rapporti geometrici delle grandezze radiometriche incidenti e uscenti da un punto

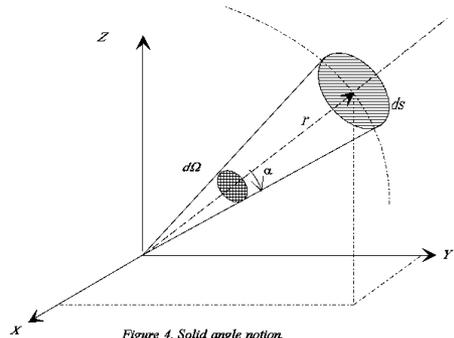
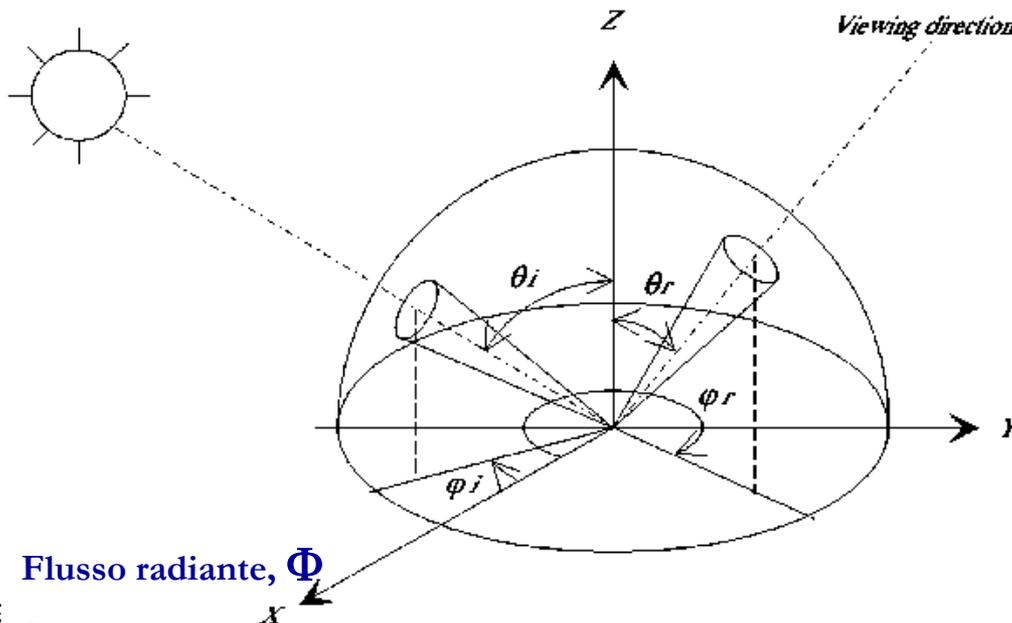


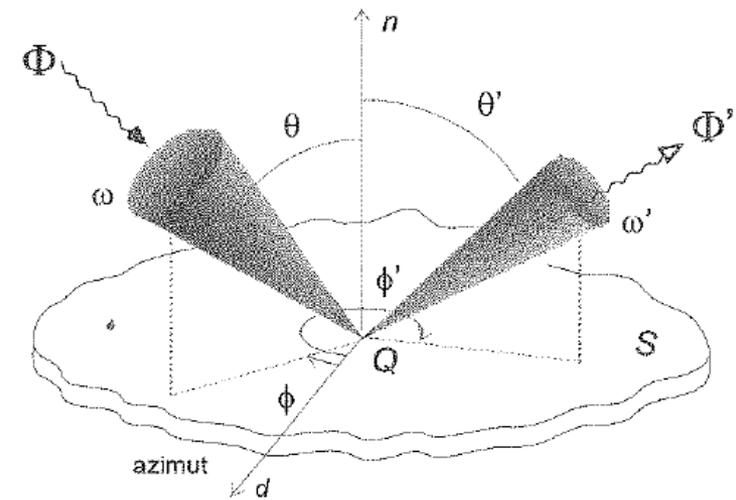
Figure 4. Solid angle notion.

Lo schema geometrico prevede un flusso radiante incidente a e uno uscente con angoli rispetto alla normale  $n$  (zenit) e alla direzione  $d$  (azimut); Gli angoli  $\theta$  e  $\phi$  sono relativi alla sorgente (flusso incidente) mentre  $\theta'$ ,  $\phi'$  sono in genere riferiti alla direzione di osservazione (flusso uscente).



Flusso radiante,  $\Phi$

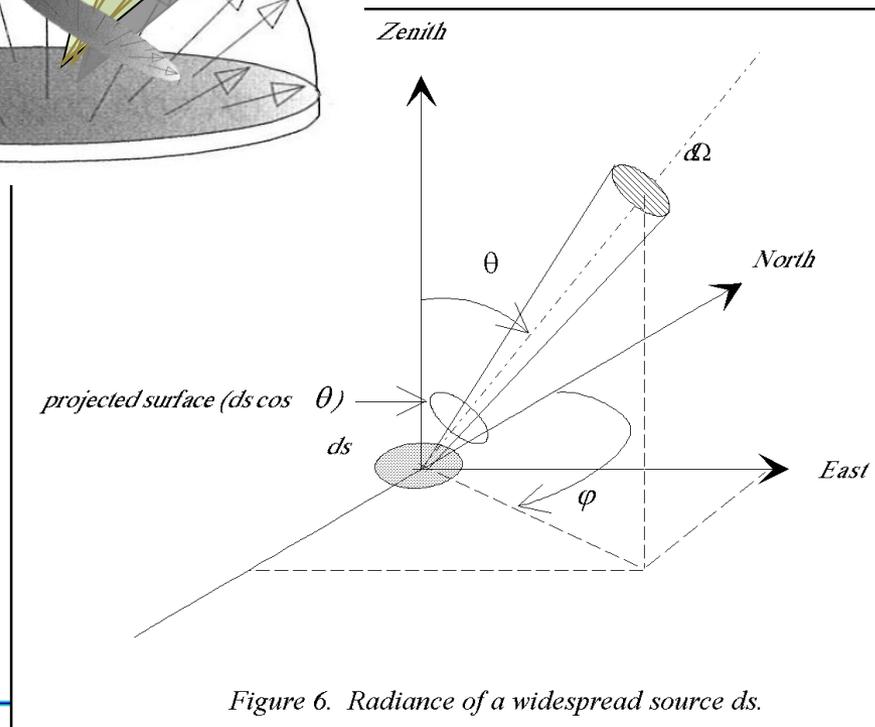
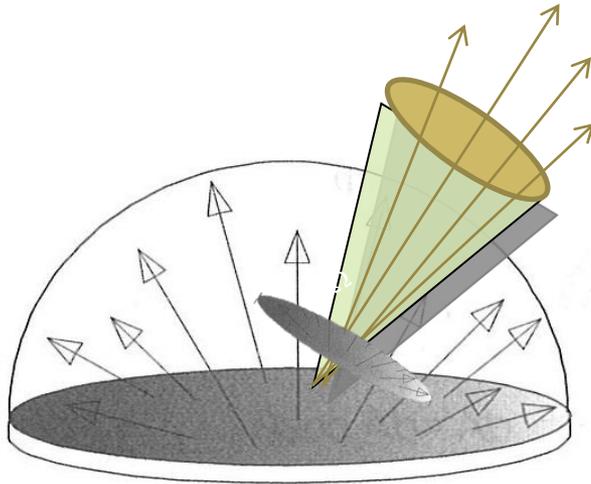
Descrizione geometria di osservazione (i=incidente; r=riflesso)



## Radianza, $L$ [ $\text{W Sr}^{-1} \text{m}^{-2}$ ]

È il valore del flusso radiante  $d\Phi$  misurato per unità di angolo solido e per unità di superficie proiettata ( $ds \cos \theta$ ) in una data direzione e su un piano ortogonale a tale direzione. L'angolo  $\theta$  è l'angolo tra la direzione di osservazione e la normale alla superficie interessata

$$L = \frac{d\Phi/d\Omega}{ds \cos \theta}$$



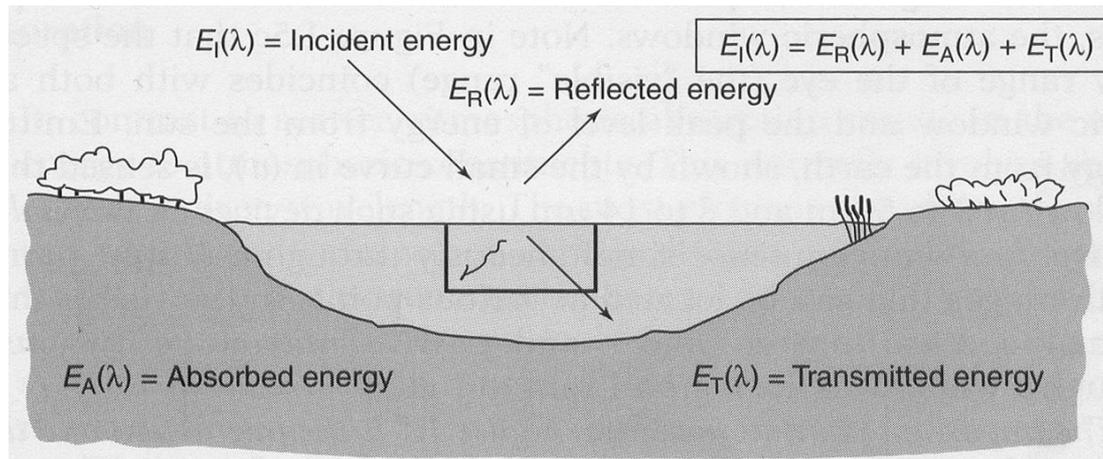
Il concetto di Radianza è quindi legato alla geometria di osservazione e alle caratteristiche strumentali e quindi è la grandezza radiometrica cruciale nel Telerilevamento

Figure 6. Radiance of a widespread source  $ds$ .

# Interazione della radiazione EM con le superfici

Se applichiamo il principio di conservazione dell'energia possiamo vedere le relazioni tra queste interazioni

$$E_i(\lambda) = E_r(\lambda) + E_a(\lambda) + E_t(\lambda)$$



$E_i(\lambda)$  = energia incidente

$E_r(\lambda)$  = energia riflessa: la radiazione viene riflessa dalla superficie

$E_a(\lambda)$  = energia assorbita: la superficie assorbe EM e si scalda; l'oggetto a sua volta emette radiazioni in accordo alla legge di Stefan-Boltzman

$E_t(\lambda)$  = energia trasmessa: la radiazione passa attraverso l'oggetto

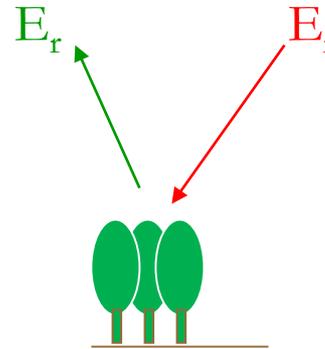
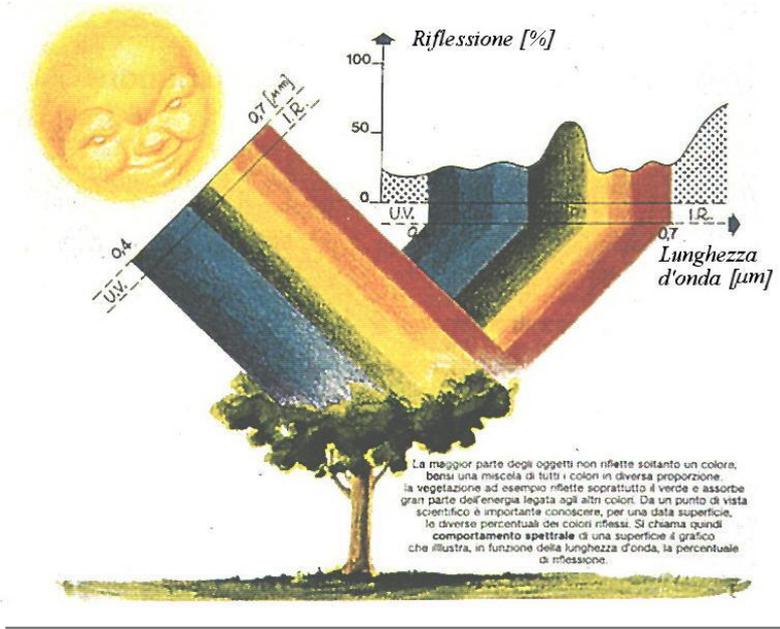
# Interazione della radiazione EM con le superfici

*Poiché la maggior parte dei sistemi di telerilevamento operano nelle regioni in cui le lunghezze d'onda sono principalmente riflesse (VIS e infrarosso riflesso NIR e SWIR), la RIFLETTANZA è il parametro più importante*

*la RIFLETTANZA è una misura della capacità della superficie di riflettere l'energia incidente*

$$E_r(\lambda) = E_i(\lambda) - [E_a(\lambda) + E_t(\lambda)] \quad \rho(\lambda) = E_r(\lambda) / E_i(\lambda)$$

# Una proprietà ottica: la riflettanza VIS-NIR-SWIR

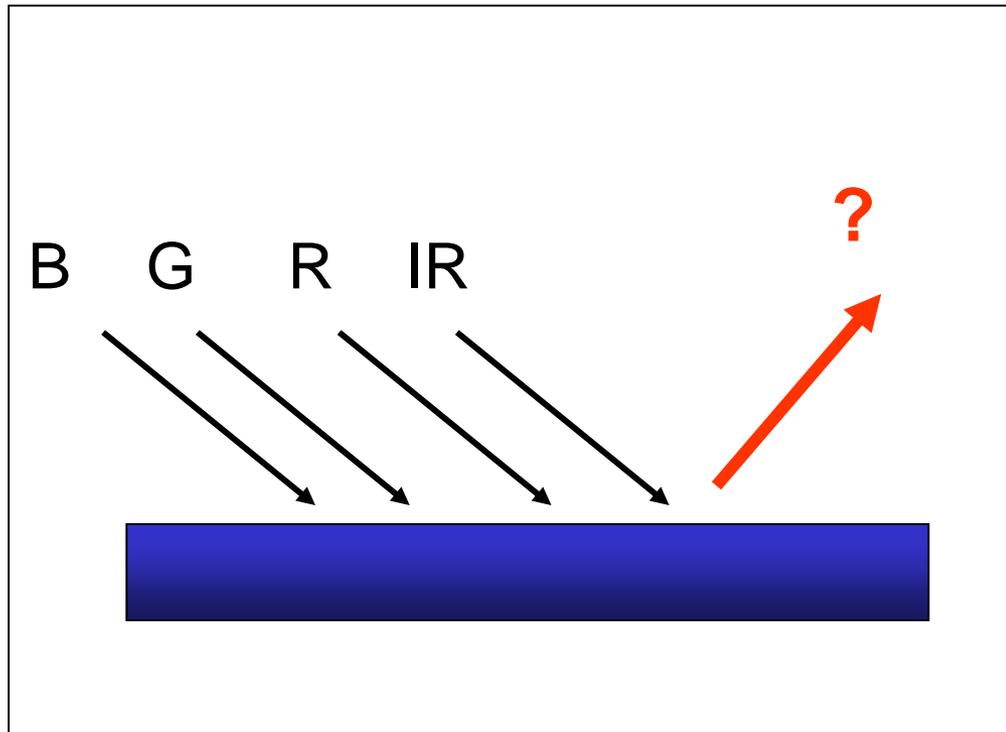


$$\rho(\lambda) = E_r(\lambda) / E_i(\lambda)$$

- Data una  $E_{i\lambda}$  il fenomeno della riflessione dipende sostanzialmente da due fattori:
  - Caratteristiche fisiche della superficie interessata;
  - Geometria del binomio sorgente-osservatore
- In generale le superfici naturali sono anisotrope e riflettono la radiazione incidente in modo diverso a seconda delle diverse combinazioni della coppia incidenza-osservazioni
- Necessità di avere una funzione descrittiva della riflessione ai vari angoli → BRDF

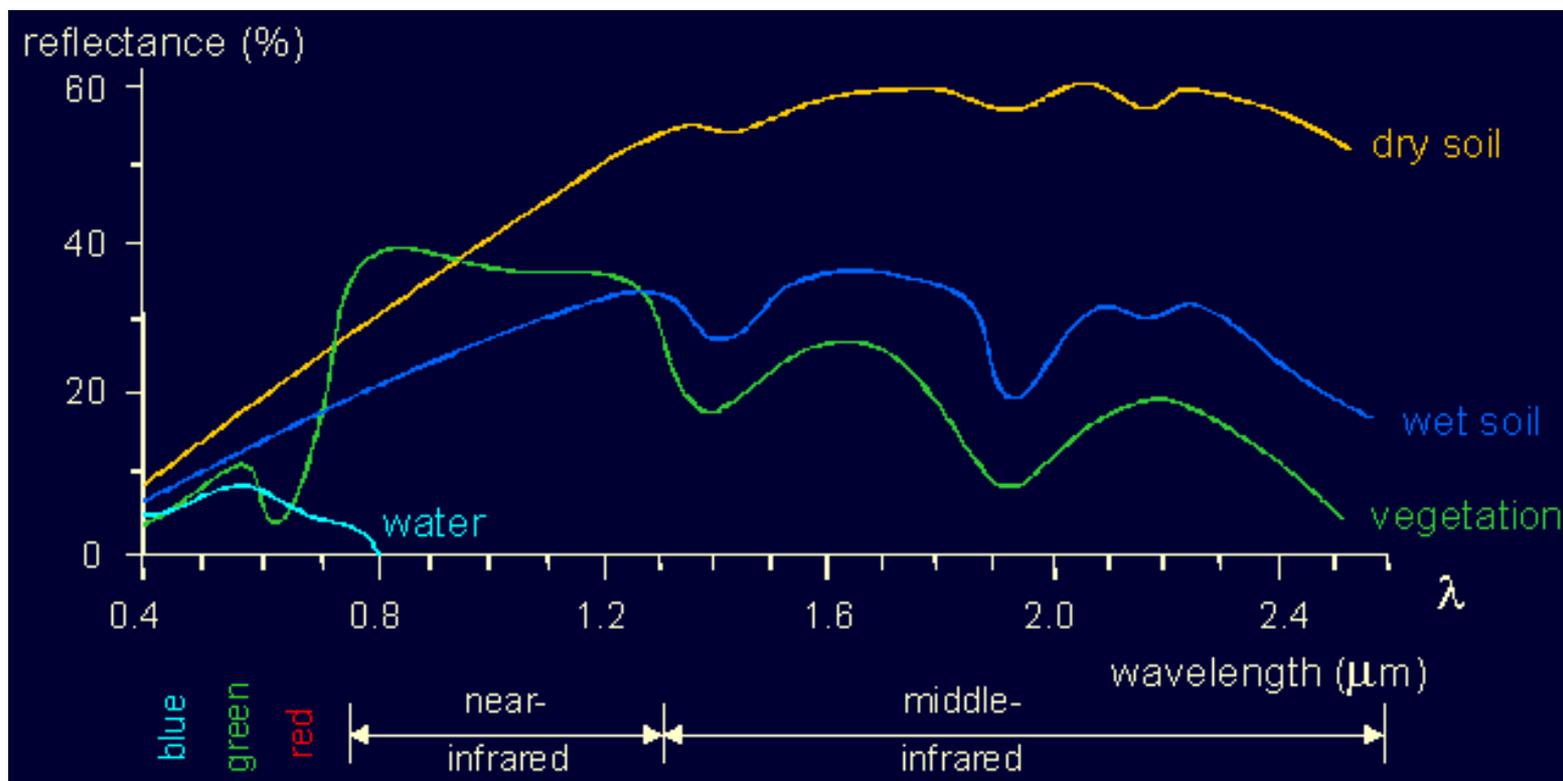
## Che cos'è una firma spettrale

***La firma spettrale è sostanzialmente un grafico che ci informa sulle capacità di riflessione di una determinata superficie in funzione della lunghezza d'onda della radiazione incidente***



# Interazione della radiazione EM con le superfici

## Riflettività spettrale (analisi spettrale delle superfici)



Poiché la riflettanza varia con la lunghezza d'onda, anche la quantità di radiazione riflessa da una superficie sarà variabile con  $\lambda$ .

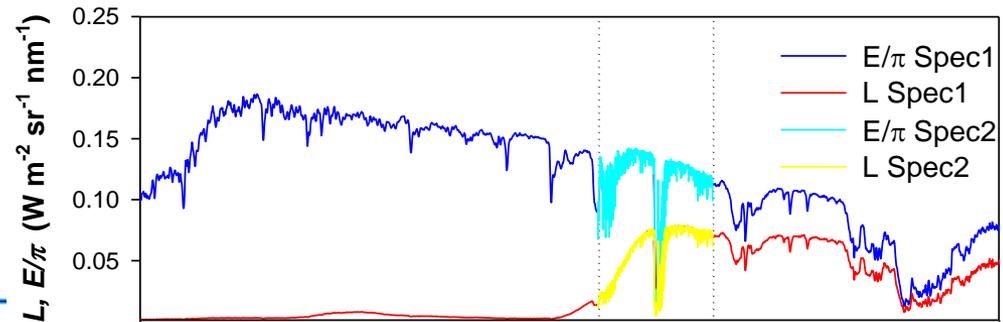
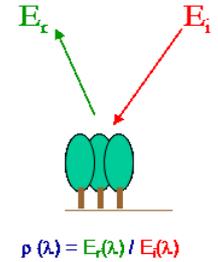
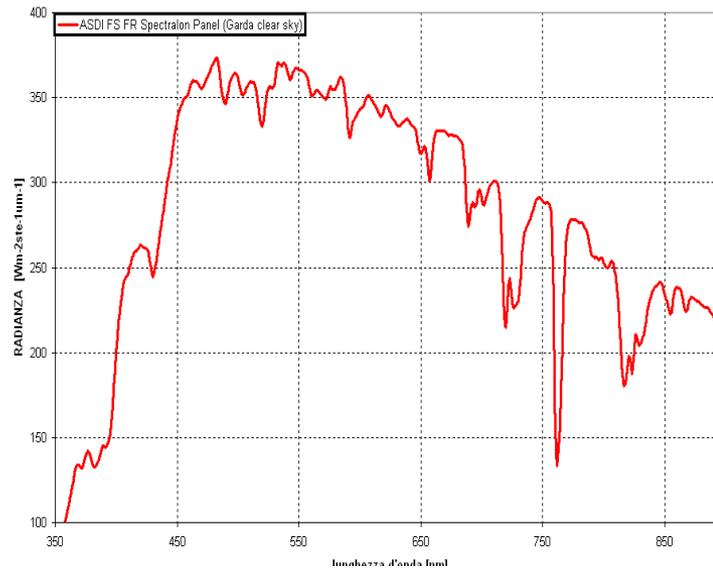
La radiazione EM riflessa da una superficie sarà quindi :

$$E_r(\lambda) = \rho(\lambda) * E_i(\lambda)$$

# Misure di radianza riflessa (incidente e riflessa dalla superficie)



~38% della energia totale irradiata dal sole è posta nella regione spettrale del visibile



Liceo Manzoni, 22 Settembre 2021

# In sintesi....

